

Studienarbeit

Analyse und Bewertung von Nutzungsoptionen der SOFC als Antriebsaggregat im Mobilitätssektor

Felix Moog

Matrikel-Nr.: 423810

Eingereicht am: 04.07.2016

Betreuer: Dr.-Ing. Andreas Lindermeir (CUTEC-Institut)

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt und alle Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe.

Hannover, 04.07.2016

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Formelzeichen und Abkürzungen	v
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Grundlagen der SOFC	3
3 Stand der Technik	8
3.1 SOFC-Systeme	8
3.1.1 SOFCs im für den Fahrzeugantrieb relevanten Leistungsbereich	8
3.1.2 Startzeit von SOFCs	8
3.1.3 Gravimetrische Leistungsdichte von SOFCs	8
3.1.4 Volumetrische Leistungsdichte von SOFCs	9
3.1.5 Dynamik von SOFCs	9
3.1.6 Teillast	10
3.1.7 Degradation und Lebensdauer von SOFCs	10
3.1.8 Emissionen	11
3.1.9 Wirkungsgrad von SOFC-Systemen	12
3.2 SOFCs in Fahrzeugen	14
3.3 Vergleichende Beschreibung von Antriebskomponenten	18
3.3.1 Elektrische Maschine, Verbrennungsmotor	19
3.3.2 Akkumulator, Kondensator, chemische Energiespeicher/-wandler	21
3.3.3 PEMFC, SOFC	25
4 SOFC-basierte Antriebskonzepte für Fahrzeuge	30
4.1 Systematik: Kombinationsmöglichkeiten von SOFC, Verbrennungsmotor und Stromspeicher	30
4.2 Dauerbetrieb von SOFCs in Fahrzeugen	34
4.3 Nutzerrelevante Aspekte bei mit 1-Punkt-Strategie betriebenen SOFC-PHEVs	37

4.3.1	Antriebsseitige Aspekte	37
4.3.2	Nutzerseitige Aspekte	40
4.3.3	Eingrenzung möglicher Anwendungsfälle	44
5	Auswirkungen auf den Stromsektor	46
6	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	50
	Literaturverzeichnis	I

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise einer SOFC (eigene Darstellung aufbauend auf Schlitzberger 2012)	3
Abbildung 2.2: SOFC-System mit externer Reformierung und partieller Anodenabgasrezirkulation (eigene Darstellung aufbauend auf Schlitzberger (2012) und Stenger (2014)).....	6
Abbildung 4.1: Kombinationsmöglichkeiten von Brennstoffzellen mit Verbrennungsmotoren und Stromspeichern in Fahrzeugen: anteilige Bereitstellung von Energie für ein bestimmtes Fahrprofil, Zahlenangaben in Prozent. Grün eingefärbte Bereiche sind möglicherweise besonders gut geeignet.....	32
Abbildung 5.1: Typische Zyklen der Last in Deutschland - Winterwoche und Sommerwoche (Quelle: Peek und Diels 2016).....	46
Abbildung 5.2: Durchschnittliche monatliche Last in Deutschland – Mittel über die Jahre 2007 bis 2012 (Quelle: Peek und Diels 2016)	47

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionsfaktoren für ein mit Erdgas betriebenes SOFC-System (Quelle: Giannopoulos und Founti 2010)	12
Tabelle 2: Gegenüberstellung von Eigenschaften elektrischer Maschinen und Verbrennungsmotoren, basierend auf Oswald (2010)	19
Tabelle 3: Veränderungen im Antriebsstrang beim Umstieg vom Antrieb mit Verbrennungsmotor auf ein batterieelektrisch angetriebenes Fahrzeug (Quelle: Kampker et al. 2013)	20
Tabelle 4: Anhaltswerte für Heizwerte möglicher Treibstoffe (ohne Tank)	23
Tabelle 5: Gegenüberstellung von Eigenschaften von SOFC-Systemen und Verbrennungsmotor in Anlehnung an Tabelle 2	24
Tabelle 6: Masse von SOFC-/Tanksystem und Akkumulator bei Bereitstellung der selben Energiemenge bei unterschiedlichen Betriebsdauern (Ergebnisse aus Überschlagsrechnung)	37
Tabelle 7: Gesichtspunkte für die Bewertung von Antriebssystemen und kurze Einordnung, inwiefern SOFC-HEVs den Anforderungen gerecht werden können (Punkte zusammengestellt auf Basis von Stan (2012) sowie Hoepke und Breuer (2013))	40

Formelzeichen und Abkürzungen

Symbol	Bedeutung	Einheit
--------	-----------	---------

Lateinische Formelzeichen

ΔG	freie Reaktionsenthalpie	[J/mol]
ΔH	Reaktionsenthalpie	[J/mol]
HG	Hybridisierungsgrad	[-]
P	Leistung	[J/s]
ΔS	Reaktionsentropie	[J/mol K]
T	Temperatur	[K]
T_0	höchste Temperatur	[K]
T_u	niedrigste Temperatur	[K]

Griechische Formelzeichen

η_{th}	thermodynamischer Wirkungsgrad	[-]
-------------	--------------------------------	-----

Indizes

Sp	Speicher
BZ	Brennstoffzelle
max	maximaler Wert
out	Ausspeichern
R	Reaktion

Mathematische Operatoren

Σ	Summe
----------	-------

Abkürzungen

<i>AAGR</i>	Anodenabgasrecycling
<i>ABSOLUTE</i>	Advanced Battery Solid Oxide fuel cell Linked Unit To maximise Efficiency
<i>AHL</i>	Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung
<i>APU</i>	Auxiliary Power Unit

<i>ASC</i>	Anode Supported Cell
<i>ATR</i>	Autotherme Reformierung
<i>BEV</i>	Battery Electric Vehicle
<i>CNG</i>	Compressed Natural Gas
<i>CPOX</i>	Catalytic Partial Oxidation
<i>DESTA</i>	Demonstration of first SOFC Truck APU
<i>DME</i>	Dimethylether
<i>DOE</i>	United States Department of Energy
<i>ENSA</i>	Entwicklung Nebenaggregate SOFC-APU
<i>ESC</i>	Electrolyte Supported Cell
<i>DSK</i>	Doppelschichtkondensator
<i>EU</i>	Europäische Union
<i>FC</i>	Fuel Cell
<i>FCHV</i>	Fuel Cell Hybrid Vehicle
<i>FCV</i>	Fuel Cell Vehicle
<i>GT</i>	Gas Turbine
<i>GuD</i>	Gas- und Dampfturbinen
<i>HEV</i>	Hybrid Electric Vehicle
<i>HT</i>	High Temperature
<i>HV</i>	Hybrid Vehicle
<i>ICE</i>	Internal Combustion Engine
<i>ICEV</i>	Internal Combustion Engine Vehicle
<i>i. N.</i>	im Normalzustand
<i>IT-SOFC</i>	Intermediate-Temperature SOFC
<i>KWK</i>	Kraft-Wärme-Kopplung
<i>Lkw</i>	Lastkraftwagen
<i>LNG</i>	Liquefied Natural Gas
<i>LPG</i>	Liquefied Petroleum Gas
<i>MSC</i>	Metal Supported Cell
<i>mSOFC</i>	micro-tubular Solid Oxide Fuel Cell
<i>NIP</i>	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie
<i>NMHC</i>	Non-Methane Hydrocarbons
<i>PEMFC</i>	Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell
<i>PHEV</i>	Plug-in Hybrid Electric Vehicle

<i>POX</i>	Partielle Oxidation
<i>SAPIENS</i>	SOFC Auxiliary Power in Emissions/Noises Solutions
<i>SchIBZ</i>	Schiffsintegration Brennstoffzelle
<i>SECA</i>	Solid State Energy Conversion Alliance
<i>SOEC</i>	Solid Oxide Electrolyser Cell
<i>SOFC</i>	Solid Oxide Fuel Cell
<i>UAV</i>	Unmanned Aerial Vehicle
<i>ZEBRA</i>	Zero Emission Battery Research Activities
<i>Zeus</i>	Zell- und Stackentwicklung

Chemische Formelzeichen

CH_4	Methan
C_nH_m	Kohlenwasserstoff
CO	Kohlenstoffmonoxid
CO_2	Kohlenstoffdioxid
e^-	Elektron
g	gasförmig
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser(dampf)
l	flüssig
NO_x	Stickoxide
O_2	Sauerstoff

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Mit Verkehr ist eine Reihe von Problemen verbunden. Beispiele sind Emissionen von Treibhausgasen, klassischen Schadstoffen und Lärm, Unfälle, Flächenverbrauch und Minderung der Aufenthaltsqualität in Städten durch Platzbeanspruchung. Verkehrsvermeidung und -verlagerung sind systemische Lösungsansätze, mit denen viele der Probleme gleichzeitig angegangen werden sollen, ohne dass die Befriedigung von Mobilitätsbedürfnissen beeinträchtigt wird. Angewendet, beeinflussen sie in starkem Maße die Wahl und Bedeutung technischer Lösungsansätze und sind umgekehrt auch stark von den verfügbaren Techniken abhängig. Technische Lösungen unterliegen oft Rebound-Effekten, sodass ihr Potential für sich allein genommen weniger zum Tragen kommen kann als eingebettet in ein Konzept mit systemischem Ansatz.

Ein im Rahmen des Klimaschutzes verfolgter Ansatz ist, im gesamten Energiesystem die Verwendung fossiler Energie durch die Verwendung anderer Energiequellen zu ersetzen. Der mögliche Beitrag von Biotreibstoffen zur Energieversorgung im Verkehrssektor in Deutschland gilt als begrenzt. Die Energiebereitstellung wird zukünftig voraussichtlich überwiegend strombasiert sein: teils durch direkte Bereitstellung elektrischer Energie, teils über strombasierte Treibstoffe. Rein elektrisch betriebene Fahrzeuge weisen bei Verwendung erneuerbarer Energiequellen einen hohen Well-to-Wheel-Wirkungsgrad auf, die Emissionen beim Fahren sind gering. Werden regenerativ erzeugte strombasierte Treibstoffe verwendet, ist der Well-to-Wheel-Wirkungsgrad geringer. Durch Austauschen des Kraftstoffes ohne weitere Maßnahmen sind zudem keine wesentlichen Änderungen bei den Lärm- und Schadstoffemissionen zu erwarten.

Brennstoffzellen zeichnen sich im Vergleich zum heute dominierenden Verbrennungsmotor durch hohe Wirkungsgrade und geringe Emissionen aus. Beim Betrieb der heute in Brennstoffzellenfahrzeugen gebräuchlichen PEMFCs wird sich auf den Treibstoff Wasserstoff beschränkt. SOFCs weisen dagegen eine hohe Brennstoffflexibilität auf. Diese Hochtemperatur-Brennstoffzellen werden jedoch bisher vor allem für die stationäre Stromerzeugung eingesetzt.

In dieser Arbeit soll untersucht werden, inwiefern sich SOFCs zum Antrieb von Fahrzeugen eignen könnten und wie gegebenenfalls entsprechende Antriebskonzepte allgemein und in naher Zukunft gestaltet sein könnten. Dies soll vor dem Hintergrund betrachtet werden, dass sich das gesamte Energiesystem wandelt und die Energiesektoren zunehmend miteinander verbunden werden.

In Kapitel 2 wird auf die Grundlagen von SOFCs sowie SOFC-Systemen eingegangen. In Kapitel 3 wird auf die für den Fahrzeugantrieb besonders relevanten technischen Eigenschaften von SOFC-System eingegangen. Zudem werden bisherige Konzepte zum Einsatz von SOFCs vorgestellt. Des Weiteren werden gängige Antriebskomponenten besprochen und die SOFC so in konkurrierende Konzepte eingeordnet. Im ersten Teil von Kapitel 4 werden mögliche auf SOFCs basierende Antriebskonzepte zunächst systematisiert und allgemein diskutiert. Dann wird ein mit dem in den vorigen Kapiteln beschriebenen Stand der Technik begründeter und durch einen Dauerbetrieb der SOFCs

gekennzeichneter Sonderfall eines Antriebssystems vorgestellt und dessen Auswirkungen schließlich diskutiert. Kapitel 5 dient der Betrachtung möglicher Wirkungen von SOFC-Fahrzeugen auf den Stromsektor, Kapitel 6 weiteren Schlussfolgerungen und einem Ausblick.

2 Grundlagen der SOFC

Brennstoffzellen sind elektrochemische Reaktoren für die direkte Umwandlung chemischer Energie in elektrische Energie. Während für die Energiewandlung in Wärmekraftmaschinen der Brennstoff mit Sauerstoff gemischt und verbrannt wird, finden die Oxidation des Brennstoffs und die Reduktion des Sauerstoffs in Brennstoffzellen räumlich getrennt statt. Bei der Oxidation werden Elektronen an eine Elektrode, die Anode, abgegeben. Diese werden zu einer zweiten Elektrode, der Kathode, transportiert und bei der Reduktion des Sauerstoffs von diesem aufgenommen. Der dabei fließende elektrische Strom kann von einem Stromverbraucher genutzt werden. Der Stromkreis ist geschlossen, da bestimmte Ionen zwischen Anoden- und Kathodenseite durch eine semipermeable Membran oder einen Elektrolyt ausgetauscht werden (vgl. Abbildung 2.1). Die Triebkraft für den Ionentransport ist das durch die kontinuierliche Zuführung der Reaktanden und die ablaufenden chemischen Reaktionen aufrecht erhaltene Konzentrationsgefälle.

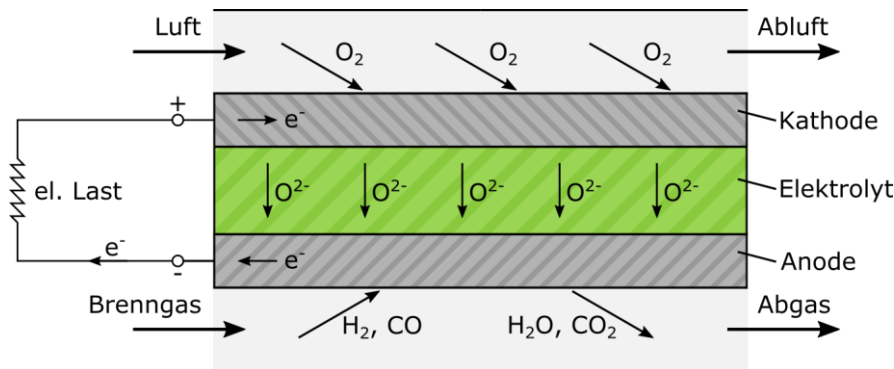


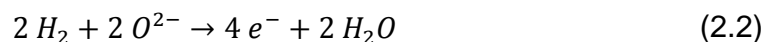
Abbildung 2.1: Prinzipieller Aufbau und Funktionsweise einer SOFC (eigene Darstellung aufbauend auf Schlitzberger 2012)

Festoxid-Brennstoffzellen (solid oxide fuel cells, SOFCs) sind durch oxidkeramische Elektrolyten gekennzeichnet. Durch diese werden üblicherweise Sauerstoffionen (O^{2-}) transportiert, geforscht wird jedoch auch zum Transport von Wasserstoffionen (H^+) (Bi et al. 2015).

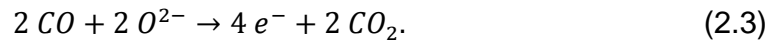
Leitet der Elektrolyt Sauerstoffionen, findet auf der Kathodenseite folgende elektrochemische Reaktion statt:



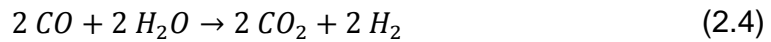
Ein Sauerstoffmolekül wird unter Elektronenaufnahme zu zwei Sauerstoffionen reduziert. Befindet sich Wasserstoff im Brennstoff, wird an der Anode durch die Reaktion



Wasserdampf erzeugt. Auch Kohlenstoffmonoxid kann direkt an der Anode oxidiert werden:



Ein weiterer Pfad für die Oxidation von Kohlenstoffmonoxid führt über die leicht exotherme Wassergas-Shift-Reaktion



mit anschließender Oxidation des erzeugten Wasserstoffs nach Gleichung 2.2.

Mit Betriebstemperaturen, die typischerweise zwischen 500 °C und 1000 °C liegen, werden SOFCs zu den Hochtemperatur-Brennstoffzellen gezählt. Die hohen Betriebstemperaturen sind mit Vorteilen der SOFC wie Brennstoffflexibilität, geringen Ansprüchen an die Katalysatoren der Elektroden und hohem Exergieanteil der Abwärme verbunden. Gleichzeitig führen sie zu Nachteilen und Herausforderungen, beispielsweise durch Einschränkung der Auswahl geeigneter Materialien, Schäden durch Wärmespannungen und lange Start- bzw. Aufheizzeiten.

Es existiert ein Trend hin zu niedrigen Betriebstemperaturen (Schlitzberger 2012), jedoch ist das Konzept eines SOFC-Systems von vielen Faktoren abhängig. Dieses Kapitel soll einen Überblick über wichtige Zusammenhänge verschaffen, für ein tieferes Verständnis muss jedoch auf die Fachliteratur verwiesen werden, z. B. Winkler (2002) und Schlitzberger (2012), an denen sich dieses Kapitel orientiert.

Die Betriebstemperatur wird unter anderem durch das verwendete Stütz- bzw. Trägerschichtkonzept beeinflusst, welches die mechanische Stabilität des Verbunds aus Elektrolyt und Elektroden gewährleisten muss. So werden elektrolytgestützte Zellen (electrolyte supported cells, ESCs) bei hohen Temperaturen betrieben, um eine ausreichende Leistungsdichte zu sicherzustellen. Anodengestützte Zellen (anode supported cells, ASCs) kommen aufgrund einer sehr dünnen Elektrolytschicht auch bei geringeren Betriebstemperaturen auf höhere Leistungsdichten. Geringer sind die Leistungsdichten bei metallgestützten Zellen (metal supported cells, MSCs). Des Weiteren beeinflusst das Stütz- bzw. Trägerschichtkonzept Faktoren wie Leitfähigkeit, Degradation, Abdichtung und Produktionsaufwand (Schlitzberger 2012).

Beim Design von SOFCs gibt es zwei Grundformen: planare (ebene) und tubulare (röhrenförmige) Zellen. Neben verschiedenen Ausführungen existieren auch Konzepte, die sich als Kombination aus beiden Grundformen auffassen lassen. Das Design hat unter anderem Auswirkungen auf die Leistungsdichte, die Möglichkeit zur internen Reformierung, Herstellungsaufwand, Aufwand für die Abdichtung, das Auftreten von Thermospannungen und Druckverluste im Stack. Ein Trend zu Mikrostrukturen zielt etwa auf hohe spezifische Leistungsdichten, geringe Betriebstemperaturen und verkürzte Startzeiten sowie schnellere Lastwechsel ab. Dem können höhere Druckverluste, ein erhöhter Fertigungsaufwand und geringe Leiterquerschnitte für den Stromabtransport gegenüberstehen (Schlitzberger 2012).

Elektrolyt, Elektroden und Interkonnekt-Struktur werden zu einer Zelle zusammengefasst. Metallische oder keramische Interkonnektoren sorgen für die Abführung des elektrischen Stroms und führen die Gasströmungen. Mehrere Zellen werden zu Brenn-

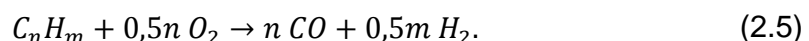
stoffzellenstacks verbunden. Die serielle elektrische Verschaltung von Anoden mit Kathoden sorgt für technisch nutzbare elektrische Spannungen bei moderaten elektrischen Strömen, aber auch Parallel- oder Hybridschaltungen können sinnvoll sein. Bezüglich der Gasführung müssen Dichtungen die Trennung der verschiedenen Ströme innerhalb des Stacks sowie nach außen gewährleisten. Alle Zellen müssen gleichmäßig mit Prozessgasen versorgt werden, gleichzeitig muss die Wärmeabfuhr gewährleistet sein. Hohe Temperaturgradienten können zu Wärmespannungen führen, die mechanische Stabilität ist zu gewährleisten (Schlitzberger 2012).

Zur Einstellung der Betriebszustände und Randbedingungen des SOFC-Stacks werden weitere Komponenten und Anlagenteile benötigt. Da dadurch die hohen erreichbaren elektrischen Wirkungsgrade von SOFC-Systemen erklärbar werden, soll zunächst auf die Erzeugung des Brenngases eingegangen werden, welches dem Stack zugeführt wird.

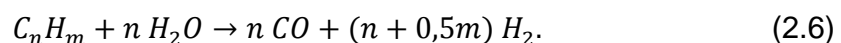
Brennstoffe müssen in der Regel in ein wasserstoffreiches Synthesegas umgewandelt werden, da im SOFC-Stack nur Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid elektrochemisch oxidiert werden können. Grundsätzlich kommen feste, flüssige und gasförmige Brennstoffe infrage. Da die Aufbereitung vieler Brennstoffe für den Einsatz in SOFC-Systemen einen geringen Aufwand erfordert, wird diesen eine hohe Brennstoffflexibilität zugesprochen.

Aus gasförmigen, ggf. verdampften Kohlenwasserstoffen lassen sich mit verschiedenen Verfahren geeignete Synthesegase erzeugen. Auf die Reformierungsverfahren partielle Oxidation (POX), autotherme Reformierung (ATR) und allotherme Reformierung wird im Folgenden eingegangen.

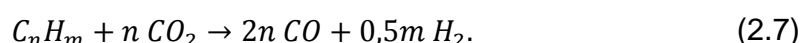
Die Reaktionsgleichung für die partielle Oxidation von Kohlenwasserstoffen C_nH_m lautet



Die Reaktion ist exotherm. Bei der Dampfreformierung wird dem Brenngas Wasserdampf zugemischt. Für die Reformierung von Kohlenwasserstoffen lautet die Reaktionsgleichung



Bei der Trockenreformierung wird statt Wasserdampf Kohlenstoffdioxid als Reformierungsmittel verwendet:



Anhand der Art der Wärmezuführung für die endotherme Dampf- und Trockenreformierung wird die autotherme von der allothermen Reformierung unterschieden. Bei der autothermen Reformierung wird die benötigte Reaktionsenthalpie durch partielle Oxidation nach Gleichung 2.5 im selben Brennraum bereitgestellt. Umgekehrt kann die partielle Oxidation als autotherme Reformierung aufgefasst werden, bei welcher das Reformierungsmittel nicht von außen zugeführt, sondern durch Teilverbrennung erzeugt wird. Bei

der allothermen Reformierung befindet sich die Wärmequelle dagegen außerhalb des Reaktionsraums, die Reaktionsenthalpie gelangt beispielsweise mit einem Gas oder über Wärmeübertrager in den Reaktionsraum.

Allotherme Reformierung kann im Brennstoffzellenstack stattfinden (interne Reformierung). Dadurch kann der Stack gekühlt werden, andere Komponenten für die Kühlung, etwa das Gebläse für die Kathodenluft, können kleiner ausgelegt werden. Allerdings können große Temperaturgradienten im Stack problematisch sein. Kohlenstoffablagerungen müssen vermieden werden, sodass nur kurzketten Kohlenwasserstoffe für interne Reformierung in Frage kommen. So lautet die Reaktionsgleichung für die Methan-Dampf-Reformierung:



Der benötigte Wasserdampf kann direkt an der Anode gewonnen werden (siehe Gleichung 2.2).

Die Vorteile der stofflichen und chemischen Kopplung von elektrochemischem Umsatz in der SOFC und Reformierung sollen anhand des Beispiels eines SOFC-Systems mit externer allothermer Reformierung durch Teilrezirkulation von heißem Anodenabgas (Anodenabgasrecycling, AAGR) verdeutlicht werden (siehe Abbildung 2.2).

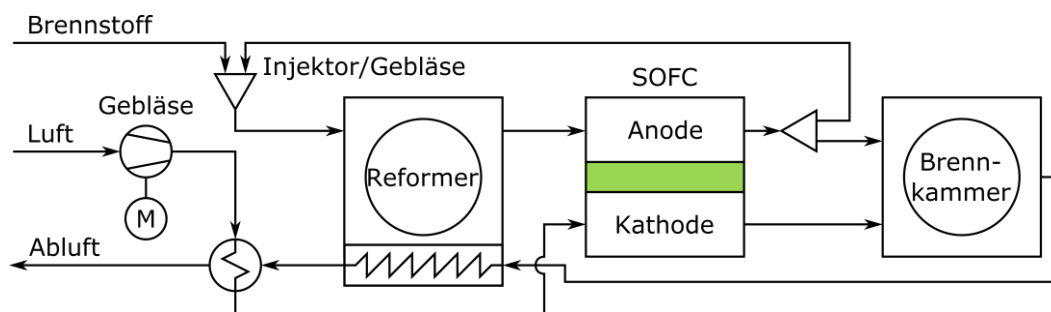


Abbildung 2.2: SOFC-System mit externer Reformierung und partieller Anodenabgasrezirkulation (eigene Darstellung aufbauend auf Schlitzberger (2012) und Stenger (2014))

Die Reaktionsprodukte aus dem Stack, Wasser und Kohlenstoffdioxid, dienen im Reformer als Reformierungsmittel, sie müssen also außer beim Anfahren des Systems nicht von außen zugeführt werden. Zudem wird die aus verschiedenen Verlustmechanismen resultierende Abwärme aus dem Stack für die Reformierung bereitgestellt. Aufgrund der endothermen Reformierungsreaktionen ist die chemische Energie des Brenngases, das den Reformer verlässt, höher als die des Brennstoffs, die dem Reformer zugeführt wird. Dieses „Prinzip der chemischen Wärmepumpe“ (Schlitzberger 2012) sorgt dafür, dass der elektrische Wirkungsgrad des Brennstoffzellensystems (bezogen auf den Heizwert des zugeführten Brennstoffs) größer sein kann als der elektrische Wirkungsgrad des SOFC-Stacks (bezogen auf den Heizwert des ihm zugeführten Brenngases). Aufgrund des hohen Temperaturniveaus der Abwärme kann der Wirkungsgrad beispielsweise durch Wärmekraftmaschinen oder thermoelektrische Konverter (HITTEC 2014) weiter erhöht werden.

Im gezeigten System steigt die Brenngasausnutzung durch die partielle Anodenabgasrezirkulation. Nicht genutztes Brenngas kann verbrannt oder anders genutzt werden. Laut Schlitzberger (2012) lassen sich mit einem solchen hochintegrierten, aber einfachen Systemkonzept die volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte von SOFC-Systemen erhöhen.

Ein Brennstoffzellensystem kann in folgende Subsysteme unterteilt werden (siehe Schlitzberger 2012):

- Brennstoffversorgungssystem
- Brennstoff-Aufbereitung/-Reinigung/-Konditionierung
- Luft-Bereitstellung/-Versorgung/-Konditionierung
- Stack inkl. Thermischer Isolierung und Gehäuse
- Elektrische Konditionierung/Netzeinspeisung
- Steuerung/Regelung/Sicherheitstechnik
- Abgassystem/Abgasbehandlung
- Nachgeschaltete Kreisläufe/Abwärmenutzung

Einsetzbar sind SOFC-Systeme in stationären, mobilen und portablen Anwendungen. Im nächsten Kapitel werden Beispiele für kommerziell verfügbare stationäre und portable Systeme genannt. Der Fokus liegt jedoch auf den mobilen Systemen, deren Markteinführung noch bevor steht.

3 Stand der Technik

In diesem Kapitel wird zunächst auf den Stand der Technik von SOFC-Systemen eingegangen, dann auf bisherige Ansätze zum Einsatz von SOFCs in Fahrzeugen und schließlich auf Energiewandler- und -speicherkonzepte, die in Fahrzeugen mit SOFC-Systemen kombiniert werden oder mit ihnen konkurrieren könnten.

3.1 SOFC-Systeme

In diesem Abschnitt wird auf Eigenschaften von SOFC-Systemen eingegangen, welche eine besondere Relevanz für den Einsatz in Fahrzeugen erwarten lassen.

3.1.1 SOFCs im für den Fahrzeugantrieb relevanten Leistungsbereich

Die elektrische Leistung von SOFC-Systemen reicht heute von wenigen Watt für mobile Strombereitstellung (Hersteller z. B. eZelleron GmbH, new enerday GmbH) über einige Kilowatt in Mikro-Blockheizkraftwerken (z. B. SOLIDpower GmbH) bis zu Kraftwerken mit mehreren Megawatt (Bloom Energy Corporation). Große Systeme besitzen mehrere Brennstoffzellenstacks und sind modular aufgebaut.

3.1.2 Startzeit von SOFCs

Die Startzeit für Kaltstarts hängt sehr stark vom Gesamtkonzept und beispielsweise der Betriebstemperatur des SOFC-Systems ab. Für planare Zellen liegt sie derzeit im Bereich von Stunden, für mikrotubulare Zellen (mSOFCs) im Bereich von Minuten. Die Startzeit lässt sich durch verschiedene Maßnahmen gezielt verkürzen. So wurden im DESTA-Projekt (siehe auch Abschnitt 3.2), in dessen Rahmen auf planaren anodengestützten Zellen basierende APUs (auxiliary power units) untersucht wurden, Kaltstartzeiten von etwas über und Warmstartzeiten unter einer Stunde erreicht (Hagerskans et al. 2015). Die DOE-Ziele (United States Department of Energy) für die Kaltstartzeit (Umgebungstemperatur: 20 °C) betrugen für das Jahr 2015 in der Leistungsklasse 1 kW bis 10 kW elektrischer Leistung für die Kraft-Wärme-Kopplung 30 Minuten und für APUs 45 Minuten (United States Department of Energy (DOE) 2012).

3.1.3 Gravimetrische Leistungsdichte von SOFCs

Herstellerangaben zur gravimetrischen Leistungsdichte von stationären und mobilen SOFC-Systemen mit planaren Zellen und Reformierung liegen überwiegend im Bereich zwischen 10 W/kg und 15 W/kg („BlueGen“ der SOLIDpower GmbH (Solidpower 2015),

„ES-5710 Energy Server“ der Bloom Energy Corporation (Bloom Energy 2015), „EN 300/500“ der new enerday GmbH (new enerday GmbH)). Auch die gravimetrische Leistungsdichte des mit mikrotubularen Zellen betriebenen „Kraftwerk“ der eZelleron GmbH soll in diesem Bereich liegen. Die im DESTA-Projekt getestete dieselbetriebene APU erreicht eine gravimetrische Leistungsdichte von 18 W/kg (Hagerskans et al. 2015). Das DOE-Ziel für dieselbetriebene APUs für das Jahr 2015 lautete 40 W/kg (United States Department of Energy (DOE) 2012). In Studien zum Einsatz von SOFCs als Fahrzeugantrieb werden gravimetrische Leistungsdichten von 100 W/kg (Aguiar et al. 2007, Rajashekara et al. 2006) oder 200 W/kg (Martinez et al. 2012a) angenommen (siehe auch Abschnitt 3.2). Heute liegen jedoch auch die gravimetrischen Leistungsdichten von Stacks meist darunter. Ein Konzept für deutlich größere gravimetrische Leistungsdichten wird von Cable et al. (2011) vorgestellt: durch ein neues Zellendesign soll ein Wert von 1 090 W/kg für planare Stacks erreicht werden.

Meadowcroft et al. (2013) beschreiben den Test eines SOFC-Systems, welches unter Verwendung von mikrotubularen Zellen und mit Katalytischer Partieller Oxidation (CPOX) eine gravimetrische Leistungsdichte von 100 W/kg erreicht. Für die Substacks werden 350 W/kg angegeben. Suzuki et al. (2007) beschreiben mikrotubulare Zellen, welche bei einer Betriebstemperatur von 550 °C eine gravimetrische Leistungsdichte von 16 900 W/kg erreichen.

3.1.4 Volumetrische Leistungsdichte von SOFCs

Die volumetrische Leistungsdichte der im DESTA-Projekt eingesetzten APU beträgt gut 16 W/L und ist damit deutlich größer als die der meisten der oben genannten SOFC-Systeme (Hagerskans et al. 2015). Das DOE-Ziel für dieselbetriebene APUs für das Jahr 2015 lautete 35 W/L (United States Department of Energy (DOE) 2012). Aguiar et al. (2007) gehen von einer volumetrischen Leistungsdichte von 100 W/L aus. Planare Stacks erreichen heute ein Mehrfaches dieses Wertes. Auch hier sind beispielsweise durch neue Herstellungsverfahren Steigerungen möglich. So berichtet das Fuel Cells Bulletin (2013) von einem gedruckten Stack, welcher eine volumetrische Leistungsdichte von 3 000 W/L besitzt.

Laut Kendall et al. (2013) erreichen SOFC-Systeme mit CPOX und mikrotubularen Zellen heute eine volumetrische Leistungsdichte von 100 W/L. Durch die Verwendung kleinerer Zelldurchmesser ließen sich 500 W/L für die Systeme erreichen (ebda.).

3.1.5 Dynamik von SOFCs

Das DOE-Ziel für die Dauer einer Leistungsänderung von 10 % auf 90 % der Nennleistung betrug für das Jahr 2015 in der Leistungsklasse 1 kW bis 10 kW elektrischer Leistung für die Kraft-Wärme-Kopplung sowie für APUs 3 Minuten (United States Department of Energy (DOE) 2012).

Auch langsamere Laständerungen von SOFC-Systemen könnten voraussichtlich durch Stromspeicher, die in vielen Fahrzeugen auch zum Zweck der Rekuperation vorhanden sein werden, kompensierbar sein. Auf das Angeben realer Werte wird daher an dieser Stelle verzichtet.

3.1.6 Teillast

Der Betriebspunkt eines SOFC-Systems ist durch eine Vielzahl von Parametern gekennzeichnet, welche von Pfafferoth et al. (2005) drei Gruppen zugeordnet werden: dem Brennstoff am Anodeneingang (Temperatur, Geschwindigkeit, Zusammensetzung), Luft am Kathodeneingang (Temperatur, Geschwindigkeit, Zusammensetzung) und ein elektrischer Parameter (für die Definition des Betriebspunktes werde entweder die Zellspannung oder der Zellstrom benötigt).

Einschränkungen des Betriebsbereichs ergeben sich durch Materialeigenschaften. So sollten bestimmte Betriebstemperaturen nicht unter- und überschritten werden. Große Temperaturgradienten führen zu thermischen Spannungen im Material. Wird eine bestimmte Zellspannung unterschritten, können Nickelkatalysatoren oxidiert werden (Redoxzyklus, siehe Abschnitt 3.1.7). Einschränkungen des Betriebsbereichs eines SOFC-Systems können auch außerhalb des Stacks begründet liegen und beispielsweise durch die Leistungsfähigkeit des Kompressors oder durch Wärmeübertrager verursacht werden.

Als eine Randbedingung ergibt sich, dass beim Betrieb von SOFC-Systemen eine Mindestleistung erforderlich ist. Beispielsweise sind für das System „EN 300/500“ der new enerday GmbH 30 % der Maximalleistung als Mindestleistung angegeben (new enerday GmbH), beim „BlueGen“ der SOLIDpower GmbH 25 % (Solidpower 2015). Laut Brett et al. (2006a) lässt sich das Verhältnis von maximaler zu minimaler Leistung („turn-down ratio“) durch eine Absenkung der minimal möglichen Betriebstemperatur vergrößern.

3.1.7 Degradation und Lebensdauer von SOFCs

Eine wesentliche Herausforderung für das Erreichen einer hohen Lebensdauer von SOFCs stellen die hohen Betriebstemperaturen dar. Die mit Temperaturänderungen verbundene Wärmeausdehnung führt zu Spannungen in der Zelle, sodass Thermozyklen zu Schäden in der Brennstoffzelle führen und so die Lebensdauer verkürzen können. Auch Redoxzyklen beeinträchtigen die Lebensdauer von SOFCs. Die Oxidation von auf der Anode als Katalysator verwendetem Nickel mit Sauerstoff ist mit einer Volumenausdehnung der Anode verbunden, welche den Stack schädigen kann. Der Sauerstoff kann durch Lecks an die Anode gelangen oder betrifft Sauerstoffionen aus dem Elektrolyten, die nicht „rechtzeitig“ mit dem Brenngas reagieren. Letzterem kann durch Begrenzung von Brennstoffnutzungsgrad (auf etwa 85 %) und Stromdichte im Elektrolyten (Zellspannung meist größer als 0,7 V) entgegengewirkt werden. Des Weiteren können bestimmte

Umweltbedingungen dem Erreichen einer hohen Lebensdauer entgegenstehen, wie der nächste Absatz verdeutlicht.

Das DOE-Ziel für die Degradation unter Berücksichtigung von Laständerungen sowie Hoch- und Runterfahren des Brennstoffzellensystems beträgt für das Jahr 2015 in der Leistungsklasse 1 kW bis 10 kW elektrischer Leistung für die Kraft-Wärme-Kopplung 0,5 %/1 000 h. Für die Tests von APU's werden tägliche und wöchentliche Zyklen zugrunde gelegt, zudem soll das Brennstoffzellensystem Vibrationen, Staub und Schwankungen von Außentemperatur und Luftfeuchtigkeit ausgesetzt werden. Unter diesen Umständen sollte im Jahr 2015 eine Degradation der APU's von 1,3 %/1 000 h erreicht werden (United States Department of Energy (DOE) 2012).

Das DOE-Ziel für die Lebensdauer – definiert als Betriebszeit, innerhalb derer die Nettoleistung des Systems um 20 % degradiert – des Brennstoffzellensystems beträgt für das Jahr 2015 in der Leistungsklasse 1 kW bis 10 kW elektrischer Leistung für die Kraft-Wärme-Kopplung 40 000 h und für APU's 15 000 h (ebda.).

Die bisher am längsten betriebene SOFC erreichte im Oktober 2015 eine Betriebszeit von 70 000 h bei einer Degradation von etwa 0,6 %/1 000 h (Forschungszentrum Jülich 2015).

3.1.8 Emissionen

Die Schadstoffemissionen hängen sowohl vom technischen Prozess, als auch von den beteiligten Stoffströmen ab. Der Betrieb einer SOFC erfordert eine Zusammensetzung des Brennstoffes, welche sich von vornherein begrenzend auf die Schadstoffemissionen auswirkt. Eine geringe Toleranz für Schwefel erfordert gegebenenfalls eine Entschwefelung des Brennstoffs und führt zu entsprechend geringen Emissionen an Schwefeldioxid. Da in der Brennstoffzelle nur Wasserstoff und Kohlenstoffmonoxid direkt für die Stromerzeugung genutzt werden können, müssen Kohlenwasserstoffe für eine hohe Brennstoffausnutzung in Synthesegas umgewandelt werden. Dabei müssen Kohlenstoffablagerungen in der Brennstoffzelle verhindert werden. Kohlenwasserstoffe und Ruß sind daher auch im Abgas nicht oder nur in geringen Mengen zu erwarten.

Da in der SOFC nicht der gesamte Brennstoff verwertet wird, kann sich im Anodenabgas eine hohe Konzentration an Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff befinden. Der nicht genutzte Brennstoff kann auf verschiedene Weise verwendet werden und wird meist verbrannt. Dabei wird der größte Teil des Kohlenstoffmonoxids zu Kohlenstoffdioxid oxidiert. Da beim Verbrennungsprozess Stickstoffoxide entstehen können, werden die Schadstoffemissionen im Wesentlichen vom Brenner bestimmt. Die CO₂-Emissionen werden dagegen bei vorgegebener Leistung maßgeblich durch den Brennstoff sowie durch den Wirkungsgrad des SOFC-Systems beeinflusst.

In Tabelle 1 sind Emissionsfaktoren für ein SOFC-System angegeben.

Tabelle 1: Emissionsfaktoren für ein mit Erdgas betriebenes SOFC-System (Quelle: Giannopoulos und Founti 2010)

Schadstoff	Emissionsfaktor [g/kWh Brennstoff]
CO ₂	203
CO	33 10 ⁻³
CH ₄	k. A.
NO _x	40 10 ⁻³
SO ₂	1,8 10 ⁻³
N ₂ O	k. A.
NMHC	3,6 10 ⁻³

Brennstoffzellensysteme gelten als leise im Vergleich zu Verbrennungsmotoren. Im DESTA-Projekt wurde der APU ein Schalldruckpegel von 58 dB(A) zugeordnet (Hagerskans et al. 2015). Für das SOFC-System „BlueGen“ der SOLIDpower GmbH wird ein Lärmpegel von weniger als 47 dB(A) angegeben (Solidpower 2015).

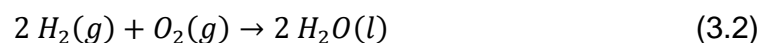
3.1.9 Wirkungsgrad von SOFC-Systemen

Aus dem ersten und zweiten Hauptsatz der Thermodynamik lässt sich der thermodynamische Wirkungsgrad η_{th} als Obergrenze für den Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle ableiten. Er hängt von den Zustandsgrößen ab, richtet sich daher auch nach dem verwendeten Brennstoff und lässt sich nach Lutz et al. (2002) zu

$$\eta_{th} = \begin{cases} \frac{\Delta G_R}{\Delta H_R} \mid \Delta S_R \leq 0 \\ \frac{\Delta G_R}{\Delta H_R - T \Delta S_R} = 1 \mid \Delta S_R > 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

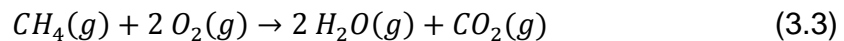
berechnen. Die maximal bei einer chemischen Reaktion gewinnbare Arbeit entspricht der freien Reaktionsenthalpie $\Delta G_R(T)$ der Reaktion R bei der Temperatur T . Zugeführt wird der Brennstoffzelle die Reaktionsenthalpie $\Delta H_R(T)$ sowie bei positiver Reaktionsentropie $\Delta S_R(T)$ Wärme aus der Umgebung, welche durch den Term $-T\Delta S_R$ berücksichtigt ist.

Für die Reaktion



ergibt sich bei einer Temperatur $T = 298,15 \text{ K}$ für den thermodynamischen Wirkungsgrad η_{th} ein Wert von 83 %. Bei gasförmigem Wasser als Reaktionsprodukt würde sich ein höherer Wirkungsgrad ergeben (s. u.).

Für die Reaktion



liegt der thermodynamische Wirkungsgrad η_{th} bis zu einer Temperatur T von etwa 2500 K bei Werten zwischen 98 % und 100 %.

Für Wasserstoff und Methan sinkt der thermodynamische Wirkungsgrad mit steigender Temperatur, sodass mehr Wärme abgeführt werden muss. Ein Teil dieser Abwärme kann in einer Wärmekraftmaschine in Arbeit umgewandelt werden. Der maximale Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine wird durch den Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta = 1 - \frac{T_u}{T_0} \quad (3.4)$$

begrenzt. Lutz et al. (2002) zeigen, dass, wenn die Temperatur der Abwärme der Brennstoffzelle der höchsten Temperatur T_0 in der Wärmekraftmaschine entspricht und die niedrigste Temperatur in der Wärmekraftmaschine durch T_u gekennzeichnet ist, der maximale Wirkungsgrad des Gesamtsystems mit Gleichung 3.1 angegeben werden kann, sofern für alle dort relevanten Temperaturen die Temperatur T_u eingesetzt wird.

Die hohe Betriebstemperatur von SOFC-Systemen stellt also für ideale Systeme keinen Nachteil dar, da die größere Abwärme zur Stromerzeugung genutzt werden kann. In realen Brennstoffzellen bewirken Verlustmechanismen das Anfallen zusätzlicher Abwärme. Diese fällt in SOFCs auf hohem Temperaturniveau an, sodass sie mit geringem Aufwand abgeführt und zu großen Teilen genutzt werden kann (vgl. Kapitel 2).

Durch irreversible Prozesse in einer realen Brennstoffzelle wird Entropie erzeugt, welche durch Wärme abtransportiert werden muss. So müssen die Reaktanden durch Aufwenden von Trennarbeit auf der Anoden- sowie Kathodenseite aus Gasgemischen gewonnen werden. Weitere Verlustmechanismen betreffen den Transport der Reaktanden aus der Kernströmung zur Elektrodenoberfläche, die Adsorption und die Ionisation der Elektrode und elektrische Leitung von Elektronen und Ionen (Winkler 2002). Die damit verbundenen Wirkungsgradverluste lassen sich durch Überspannungen quantifizieren: Schlitzberger (2012) nennt Nernst-Überspannung, Aktivierungs- bzw. Durchtrittsüberspannung, Ohmsche Überspannung und Diffusions- bzw. Konzentrationsüberspannung. Dass der Brennstoff nicht vollständig umgesetzt wird, wirkt sich ebenfalls negativ auf den Wirkungsgrad einer Brennstoffzelle aus. Hier wird die Stromstärke gegenüber der maximal möglichen reduziert.

Wo es – wie etwa bei Brennstoffzellen und Verbrennungsmotoren der Fall – angebracht ist, einen Wirkungsgrad auf zugeführte Reaktionsenthalpie zu beziehen, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass für die Reaktionsenthalpie der Heizwert des jeweiligen Brennstoffes bei Standardbedingungen angenommen wird. Der thermodynamische Wirkungsgrad beträgt dann nach Gleichung 3.1 für Wasserstoff 94,5 % und für Methan 99,8 %.

Schlitzberger (2012) untersucht verschiedene SOFC-Systeme. Mittels Simulation wird für ein mit Methan betriebenes System mit direkter interner Reformierung, planaren anodengestützten Zellen, Anodenabgasrezirkulation und einem Brenngasausnutzungsgrad von 90 % ein elektrischer Wirkungsgrad des Stacks von 50,56 % und ein elektrischer Wirkungsgrad des Gesamtsystems von 65,34 % ermittelt. Durch Kaskadierung steigt der Systemwirkungsgrad auf über 70 %. Durch dieses serielle Verschalten von in Strömungsrichtung des Brenngases hintereinander liegenden Zellelementen kann insbesondere bei hohem Brennstoffnutzungsgrad erreicht werden, dass die sich durch eine hohe Nernst-Überspannung ausdrückenden Verluste minimiert werden (Winkler 2002).

Rajashekara et al. (2006) nehmen in ihrer Studie für ein SOFC-System, welches zum Antrieb eines Autos vorgesehen ist und mit Benzin betrieben würde, einen elektrischen Wirkungsgrad von 40 % an. Aguiar et al. (2007) nehmen für ein SOFC-System, welches zum Antrieb eines Kleintransporters vorgesehen ist und mit Erdgas betrieben würde, einen elektrischen Wirkungsgrad von 48,4 % an. In der Studie von Martinez et al. (2015) wird für ein SOFC-GT-System, welches zum Antrieb einer Lokomotive vorgesehen ist und mit Erdgas oder Diesel betrieben würde, ein elektrischer Wirkungsgrad von bis zu 67 % bei Verwendung von Erdgas und bis zu 58 % bei Verwendung von Dieselkraftstoff ermittelt.

Das DOE-Ziel für den elektrischen Wirkungsgrad, bezogen auf den Heizwert, beträgt für das Jahr 2015 in der Leistungsklasse 1 kW bis 10 kW elektrischer Leistung für die Kraft-Wärme-Kopplung 42,5 % und für APUs 35 % (United States Department of Energy (DOE) 2012).

Für das mit Erdgas betriebene Brennstoffzellen-KWK-Gerät „BlueGen“ der SOLIDpower GmbH (zu dem Zeitpunkt Ceramic Fuel Cells GmbH) wurde ein elektrischer Wirkungsgrad von 60 % nachgewiesen (Sommer und Mesenhöller 2014). Für das mit Propan oder Erdgas zu betreibende SOFC-System „EN 300/500“ der new enerday GmbH wird ein Nettowirkungsgrad von 30 % bis 35 % angegeben.

Die im DESTA-Projekt entwickelte APU erreicht einen elektrischen Wirkungsgrad von 29 % und wurde mit Dieselkraftstoff betrieben (Hagerskans et al. 2015).

3.2 SOFCs in Fahrzeugen

SOFCs werden bisher nicht für den Fahrzeugantrieb eingesetzt. Jedoch gibt es Machbarkeitsstudien zu verschiedenen Konzepten zu diesem Thema. Eine Auswahl wird in diesem Abschnitt vorgestellt. Weiter fortgeschritten sind Bestrebungen, SOFCs in Fahrzeugen als APU einzusetzen. Auch hierauf wird im Folgenden eingegangen.

Project ABSOLUTE

Im „Project ABSOLUTE“ wurde ein Hybridsystem aus IT-SOFCs (intermediate-temperature SOFCs, Mitteltemperatur-SOFCs) und ZEBRA-Batterie (Natrium-Nickelchlorid-Zelle) als Antriebskonzept für leichte Nutzfahrzeuge vorgeschlagen und in mehreren Studien untersucht. Als Betriebsstrategie wurde vorgesehen, den Akkumulator zum Abdecken der Leistungsspitzen zu verwenden und die Brennstoffzelle möglichst dauerhaft zu betreiben. Dies würde ermöglichen, das Fahrzeug netzunabhängig betreiben zu können. Für die Leistung des SOFC-Systems waren maximal 5 kW vorgesehen. Zunächst wird die Auslegung des Systems für verschiedene Fahrzeugtypen, Fahrprofile und Treibstoffe beschrieben (Brett et al. 2006b). Dann liegt der Schwerpunkt auf den Fragen, welcher Temperaturbereich sich für das Brennstoffzellensystem anbietet und wie dieses mit der Batterie thermisch gekoppelt werden könnte (Brett et al. 2006a). Schließlich werden in einer Machbarkeitsstudie dem genannten Hybridsystem Antriebssysteme, die nur entweder auf einem Verbrennungsmotor, einem Brennstoffzellensystem oder einem Akkumulator basieren, gegenübergestellt und besprochen (Aguilar et al. 2007).

Auto mit protonenleitender SOFC, Ammoniak als Treibstoff

Baniasadi und Dincer (2011) stellen ein Antriebskonzept mit Wärmeauskopplung für ein leichtes mittelgroßes Auto vor und untersuchen seine Eigenschaften insbesondere in Hinblick auf Energie und Exergie. Zentrale Komponente ist eine protonenleitende SOFC, welche mit Ammoniak betrieben wird. Dies soll unter anderem einen einfachen Systemaufbau bei hohem Wirkungsgrad ermöglichen und durch für SOFCs geringe Betriebstemperaturen vergleichsweise kurze Startzeiten gewährleisten. Bei stehendem Fahrzeug wird das Brennstoffzellensystem in einen Standby-Betrieb überführt, elektrischer Strom wird dann nur für seine Eigenversorgung produziert. Für große Beschleunigungen und große Lastgradienten wird zusätzlich Strom aus einem Stromspeicher bereitgestellt, welcher vor allem durch Rekuperation geladen wird. Es werden unterschiedliche Auslegungen beider Komponenten untersucht.

Nissan

Der Automobilhersteller Nissan hat bekannt gegeben, ein SOFC-System zum Antrieb von Fahrzeugen zu entwickeln, welches mit Bio-Ethanol betrieben werden soll (Nissan Motor Co., Ltd. 2016).

Lokomotive für den Gütertransport

Martinez et al. (2015) untersuchen mittels eines detaillierten Modells eine Lokomotive für den Gütertransport, welche von einem SOFC-GT-System mit etwa 3,5 MW Leistung

angetrieben wird, wobei die Mindestleistung 25 % dieses Wertes beträgt. Die Aufteilung der Leistung zwischen SOFC und Gasturbine beträgt etwa 85:15. Im Gegensatz zu vorhergehenden Untersuchungen (Martinez et al. 2012b, Martinez et al. 2012a) wird ein Reformer in das Modell integriert. Durch die thermische Kopplung von Reformer und SOFC-GT-System steigt der Wirkungsgrad des Antriebssystems im Vergleich zum Betrieb mit aus einem Tank bereitgestelltem Reformat. Bei maximaler Leistung liegt der auf den Heizwert bezogene elektrische Wirkungsgrad für den Betrieb mit Erdgas bei 67 % und für Diesel bei 58 %, im Durchschnitt auf der untersuchten Strecke bei 60 % bzw. 52 %. Damit ergeben sich im Vergleich zum Stand der Technik von Lokomotiven mit Dieselmotor durchschnittliche Einsparungen an CO_2/NO_x für den Betrieb mit Erdgas von 53,8 %/97,7 % und für den Betrieb mit Dieselkraftstoff von 30,3 %/97,7 %. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sich SOFC-GT-Systeme für den Antrieb von Lokomotiven eignen und der Betrieb mit Wasserstoff, Erdgas und Dieselkraftstoff technisch möglich ist. Es wird festgestellt, dass sich im Fall des Betriebs mit Diesel die Zusammensetzung des Reformats aufgrund des dynamischen Betriebs zeitlich ändert. Um Kohlenstoffablagerungen in der Anode zu vermeiden, werden hier hohe Anforderungen an das Wassermanagement gestellt. Dabei besteht die Option, große Mengen an Wasser mitzuführen oder einen Anteil des Wasserdampfs im Anodenabgas zu kondensieren und rezirkulieren zu lassen. Beim Betrieb mit Methan ist der Wasserverbrauch geringer und das dynamische Verhalten unproblematisch. Der Wirkungsgrad ist nur wenig geringer als beim Betrieb mit Wasserstoff.

Kombination von Verbrennungsmotor und SOFC im Antriebssystem

Die Delphi Corporation vergleicht zwei Antriebskonzepte für Automobile (Rajashekara et al. 2006). In dem ersten dient eine SOFC als Range-Extender und lädt einen Akkumulator. Sie wird je nach Bedarf und weiteren Kriterien wie Kosten für Treibstoff und Strom zugeschaltet. Zudem besteht die Möglichkeit, das Fahrzeug als Notstromaggregat zu verwenden. Untersucht wird, welche Leistung das SOFC-System im Durchschnitt auskoppeln muss, wenn das Fahrzeug verschiedene Fahrzyklen durchlaufen soll und der Ladezustand des Akkumulators vor und nach dem Durchlauf gleich sein soll. Unter Annahme eines elektrischen Wirkungsgrades des SOFC-Systems von 40 % ist es zudem möglich, den Treibstoffbedarf zu ermitteln. Im Fall einer Leistung des SOFC-Systems von 10 kW ist es für die meisten untersuchten Fahrzyklen möglich, dass die Entladetiefe des Akkumulators bei Abschluss des Zyklus' dieselbe wie bei Beginn ist. Die Reichweite ist dann durch das Tankvolumen begrenzt, nicht durch die Kapazität des Akkumulators. Im Fall einer Leistung des SOFC-Systems von 5 kW gilt dies für drei der untersuchten Fahrzyklen.

Bei dem zweiten Antriebskonzept handelt es sich um einen Parallelhybrid aus Verbrennungsmotor und Elektromotor, welcher von einer SOFC und einem Stromspeicher (Akkumulator oder Ultrakondensator) Strom beziehen kann. Bei geringen Leistungsanforderungen und Geschwindigkeiten wird das Fahrzeug rein elektrisch angetrieben, sodass etwa in Städten mit geringen Emissionen gefahren werden kann. An-

derfalls sorgt der Verbrennungsmotor für den Antrieb. Dieser wird somit in Arbeitspunkten mit vergleichsweise hohem Wirkungsgrad genutzt.

Beide Antriebskonzepte bieten im Vergleich zum reinen Antrieb mit Verbrennungsmotor große Effizienzsteigerungspotentiale. Die Markteinführung für diese Antriebskonzepte bis 2015 wurde für möglich gehalten.

UAV mit SOFC

Meadowcroft et al. (2013) beschreiben den Test eines unbemannten Luftfahrzeugs (unmanned aerial vehicle, UAV), welches von einem Hybridsystem aus Akkumulator und mikrotubularen SOFCs angetrieben wird. Das Flugzeug hat eine Spannweite von 2 m bei einer Gesamtmasse von 6 kg. Die SOFCs werden mit Propan betrieben und haben eine Leistung von 250 W, welche nach einer Startzeit von zwölf Minuten abgerufen werden kann.

APUs

Das DOE (United States Department of Energy) setzte im Jahr 2001 das SECA-Programm (Solid State Energy Conversion Alliance) auf, in dessen Rahmen die Entwicklung von planaren SOFCs befördert werden sollte. Delphi Automotive Systems stellt 2006 den Prototypen einer auf SOFCs basierenden APU vor, welche die SECA-Phase-I-Ziele übertraf; das mit Methan betriebene System lieferte eine Leistung von maximal 4,24 kW (Behling 2013).

Nach mehreren weiteren Generationen von auf SOFCs basierenden APU-Systemen beendet Delphi sein Engagement auf diesem Gebiet im Jahr 2013 mit dem Abschluss eines Projektes, in welchem der praktische Einsatz einer dieselbetriebenen APU an einem schweren Lkw demonstriert wurde. Durch den Einsatz der APU bestand während Ruhezeiten die Möglichkeit, den Dieselmotor abzuschalten. Die Leistung wurde dem Stromverbrauch angepasst und die APU täglich über mehrere Stunden abgeschaltet. Im Rahmen des Projektes wurden zwei Systeme entwickelt: Eines eignete sich für entschwefelten Diesel und eines für „US07 diesel fuel“. Die angestrebten Ziele des DOE für APUs wurden im Fall des für nicht entschwefelten Dieseldieselkraftstoff ausgelegten Systems nur im Fall der benötigten Zeit für die Steigerung der Leistung von 10 % auf 90 % der Nennleistung erreicht (5 min). Nicht erreicht wurden sie für den Wirkungsgrad bei Nennleistung (22 % vs. 25 %), die volumetrische Leistungsdichte (8 W/L vs. 17 W/L), die gravimetrische Leistungsdichte (7 W/kg vs. 20 W/kg), die Startzeit ausgehend von 20 °C Systemtemperatur (240 min vs. 50 min) und die Degradation (18 %/1 000 h vs. 2,6 %/1 000 h). Die angegebenen Werte für das mit entschwefeltem Diesel betriebene System sind besser, erreichten – bzw. übertrafen – den Zielwert aber nur für den Wirkungsgrad bei Nennleistung: dieser lag bei 28 % (Delphi Automotive Systems, LLC 2015).

Jüngere Entwicklungen bei dieselbetriebenen SOFC-APUs für schwere Lkws betrafen die Verbundprojekte ENSA II, ENSA III und ZeuS III (Informationsdienst 2013). Schließlich wurde im DESTA-Förderprojekt (Demonstration of 1st European SOFC Truck APU) ein System erfolgreich in einer Sattelzugmaschine verbaut und eingesetzt. Verwendet wurden planare anodengestützte Zellen und metallische Interkonnektoren. Der Dieselmotorkraftstoff wurde durch katalytische partielle Oxidation (CPOX) reformiert. Zur Erhöhung der Brenngasausnutzung wurde dem Reformiergas zudem über einen Heißgasverdichter ein Teil des Anodenabgases zugeführt (Hagerskans et al. 2015).

Im EU-Projekt SAFARI (solid oxide fuel cell apu for auxiliary road-truck/installations) sind für die APU mikrotubulare SOFCs vorgesehen, in welchen Erdgas mittels CPOX aufbereitet und elektrochemisch umgesetzt wird. Dies stellt eine Vereinfachung im Vergleich zur Reformierung von Dieselmotorkraftstoff dar. Erdgas könnte in Form von LNG in Zukunft vermehrt als Kraftstoff für schwere Lkws Verwendung finden (Adelan).

Im Rahmen des Projekts SAPIENS wurde ein mit Propan betriebenes SOFC-System entwickelt und in einem Wohnmobil installiert. Mit mikrotubularen Zellen wird ermöglicht, einen Akkumulator mit einer Leistung von 100 W zu laden. Zudem wird Wärme ausgekoppelt (Adelan).

Forschungsprojekt zu SOFCs in Schiffen

Im Demonstrationsprojekt SchIBZ (SchiffsIntegration BrennstoffZelle), durchgeführt im Rahmen des Nationalen Innovationsprogramms Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP), wird ein hochseetaugliches Stromaggregat auf der Basis von planaren elektrolytgestützten SOFCs entwickelt, gefertigt und erprobt. Ein Hauptziel besteht darin, den Schadstoffausstoß von Schiffen insbesondere in Häfen zu vermindern. Die elektrische Leistung des Systems soll bei einem Wirkungsgrad von mindestens 50 % 500 kW betragen und durch einen modularen Aufbau schrittweise andere Leistungen ermöglichen. Ein großer Teil der Abwärme wird genutzt. Das System ist auf den Betrieb mit Pkw-üblichem Dieselmotorkraftstoff mit einem Schwefelgehalt von maximal 15 ppm ausgelegt, die Möglichkeit einer späteren Umstellung auf einen Betrieb mit Erdgas ist vorgesehen (vom Schloß und Leites 2014).

3.3 Vergleichende Beschreibung von Antriebskomponenten

War der Verbrennungsmotor über Jahrzehnte das zentrale Aggregat im Antriebsstrang von Fahrzeugen, wird er heute zunehmend durch andere Komponenten ergänzt oder ersetzt. In hybridelektrischen Fahrzeugen wird die Bereitstellung von mechanischer Antriebsenergie von der Wandlung chemischer Energie entkoppelt, da zusätzlich aus Stromspeichern versorgte elektrische Maschinen mechanische Antriebsenergie bereitstellen. Die Bedeutung des Verbrennungsmotors als Antriebsmotor nimmt also ab, während seine Funktion als Energiewandler für chemische Energie in den Vordergrund rückt.

Um die mögliche Rolle von SOFCs im Antriebssystem einordnen zu können, werden in den folgenden drei Abschnitten die Eigenschaften von Antriebskomponenten besprochen. Besondere Aufmerksamkeit kommt dabei dem Wirkungsgrad zu (für den Wirkungsgrad von SOFCs siehe Abschnitt 3.1.9). Zunächst wird auf Antriebsmotoren eingegangen (Abschnitt 3.3.1). In Abschnitt 3.3.2 werden Energiespeicher und Wandler-techniken für chemische Energieträger diskutiert. Die Wandlertechniken SOFC und PEMFC werden einander ausführlicher in Abschnitt 3.3.3 gegenübergestellt. Neben technischen Eigenschaften wird auch auf sich daraus ergebende Randbedingungen, die etwa das Energie- und Verkehrssystem betreffen, Bezug genommen.

3.3.1 Elektrische Maschine, Verbrennungsmotor

Mechanische Arbeit für den Fahrzeugantrieb wird fast immer von Verbrennungsmotoren oder elektrischen Maschinen geleistet. Verbrennungsmotoren wird chemische Energie zugeführt, Elektromotoren elektrische Energie. Dies führt zu wesentlichen Unterschieden bei den Eigenschaften beider Kraftmaschinen und im Antriebsstrang.

Tabelle 2: Gegenüberstellung von Eigenschaften elektrischer Maschinen und Verbrennungsmotoren, basierend auf Oswald (2010)

elektrische Maschine	Verbrennungsmotor
- theoretischer Wirkungsgrad 100 %	- theoretischer Wirkungsgrad durch Carnot-Wirkungsgrad begrenzt
- max. Drehmoment ab Drehzahl Null	- kein Drehmoment bei Drehzahl Null
- Bremsen mit Rekuperation möglich	- Bremsen ohne Rekuperation möglich
- weiter Drehzahlbereich	- mäßiger Drehzahlbereich
- geräuscharm	- lauter als elektrische Maschine
- vibrationsarm	- je nach Motor starke Vibrationen
- hohe Lebensdauer	- mäßige Lebensdauer
- kaum Wartung nötig	- regelmäßige Wartung erforderlich
- guter Wirkungsgrad im Teillastbereich	- schlechter Teillastwirkungsgrad
- produziert keine Abgase	- produziert Abgase
- Drehrichtung elektronisch steuerbar	- Schaltgetriebe für Drehrichtungswechsel nötig
- max. Drehmoment liegt zwei- bis dreifach über Nennmoment	
- kompakte Bauweise, leichter als Verbrennungsmotor gleicher Nennleistung	- größer und schwerer als elektrische Maschine gleicher Nennleistung
- Energieversorgung mit el. Strom	- Energieversorgung mit Brennstoff
- Abführen der Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau	- Abführen der Abwärme auf hohem Temperaturniveau

In Verbrennungsmotoren wird in einem Verbrennungsprozess chemische Bindungsenergie des Brennstoffs in innere Energie umgewandelt. Dabei ändert sich die Entropie aller am Prozess beteiligten Stoffströme und es wird beim Abkühlen des Verbrennungsgases Wärme übertragen, was ebenfalls zu einer Zunahme der Entropie führt. Nach dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik bedeutet dies, dass der Verbrennungsprozess irreversibel ist und es in Verbrennungskraftanlagen zu hohen Exergieverlusten kommt (Baehr und Kabelac 2012). Der Carnot-Wirkungsgrad (Gleichung 3.4) gibt eine Obergrenze für den Wirkungsgrad von Kreisprozessen an. Die Wirkungsgrade realer Prozesse liegen deutlich darunter.

Bei Ottomotoren werden heute Wirkungsgrade von bis zu 40 % erreicht (Toyota Prius), bei Dieselmotoren in Lkws etwa 44 % (van Basshuysen 2015) und bei Schiffsdieselmotoren etwa 50 % (Wikipedia 2015c).

Elektrische Energie ist frei von Entropie. Aus dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik ergeben sich keine Einschränkungen für die Umwandlung in andere Energieformen, sodass Elektromotoren theoretisch einen Wirkungsgrad von 100 % erreichen könnten (Baehr und Kabelac 2012). Reale elektrische Maschinen erreichen heute Wirkungsgrade von teils deutlich über 90 %. In Tabelle 2 werden Eigenschaften von elektrischen Maschinen und Verbrennungsmotoren einander gegenübergestellt.

Tabelle 3: Veränderungen im Antriebsstrang beim Umstieg vom Antrieb mit Verbrennungsmotor auf ein batterieelektrisch angetriebenes Fahrzeug (Quelle: Kampker et al. 2013)

obsolete Komponenten	stark veränderte Komponenten	hinzukommende Komponenten
<ul style="list-style-type: none"> - Verbrennungsmotor (Motorblock, Kolben, Dichtungen, Ventile, Nockenwellen, Ölwanne, Ölfilter, Lager) - Tanksystem - Einspritzanlage - Kupplung - Abgasanlage - Nebenaggregate (Ölpumpe, Turbolader, Lichtmaschine) 	<ul style="list-style-type: none"> - Getriebe - Radaufhängung - Kraftübertragung - Klimaanlage, Heizung - Kühlwasserpumpe - Wärmedämmung 	<ul style="list-style-type: none"> - Elektromotor (und weitere Antriebselemente) - Leistungselektronik - Batteriesystem (Akkumulator, Batteriemanagement)

Die Wahl des Antriebsmotors in einem Fahrzeug beeinflusst in hohem Maße den gesamten Antriebsstrang. In Tabelle 3 sind beispielhaft Unterschiede bei den Komponenten eines Fahrzeugs mit Verbrennungsmotor und eines Fahrzeugs mit batterieelektrischem Antrieb aufgeführt. Nicht nur die Komponenten selbst unterscheiden sich, sondern auch

die Möglichkeiten, sie räumlich anzuordnen. So ergeben sich für Elektrofahrzeuge für den Bauraum neue Nutzungspotentiale (Kampker et al. 2013) und durch Einzelradantriebe könnte die Fahrdynamik weiter verbessert werden.

Elektrische Maschinen sind Verbrennungsmotoren in vielen Belangen überlegen. Die Versorgung mit Energie gestaltet sich in vielen Fällen jedoch schwieriger. Entweder wird das Fahrzeug über eine Verbindung zu geeigneter Infrastruktur dauerhaft mit elektrischem Strom versorgt, oder das Fahrzeug muss einen Energiespeicher mitführen. In den beiden folgenden Abschnitten wird näher auf die zweite Möglichkeit eingegangen.

3.3.2 Akkumulator, Kondensator, chemische Energiespeicher/-wandler

Nicht leitungsgebundene Fahrzeuge müssen einen Energiespeicher mitführen, welcher dem Motor die Antriebsenergie zur Verfügung stellt. Sterner und Stadler (2014) beschreiben ausführlich eine Vielzahl an Techniken der Energiespeicherung und teilen sie nach ihrem Funktionsprinzip in elektrische, elektrochemische, chemische, mechanische und thermische Energiespeicher ein. Aus der Vielfalt der Speichertechniken können nach geeigneten Kriterien die für die Anwendung in Fahrzeugen geeigneten Techniken ausgewählt werden. Mögliche Kriterien sind:

- volumetrische Leistungs- und Energiedichte
- gravimetrische Leistungs- und Energiedichte
- Wirkungsgrad (insbesondere in Hinblick auf die Bereitstellung von elektrischem Strom)
- Einspeicherung während der Fahrt möglich (Rekuperation)
- Sicherheit, Toxizität, mechanische Stabilität
- benötigte Infrastruktur
- zyklische und kalendarische Lebensdauer

Bei folgenden Speichertechniken findet der Einsatz in Fahrzeugen statt oder wird erwogen: Schwungmassenspeicher, Redox-Flow-Batterien, Kondensatoren, Akkumulatoren und chemische Energiespeicher mit geeigneten Ausspeichertechniken wie Brennstoffzelle, Gasturbine oder Verbrennungsmotor. Auf die drei letztgenannten Speichertechniken wird im Folgenden näher eingegangen.

Doppelschichtkondensator

Doppelschichtkondensatoren (DSKs) haben eine gravimetrische Energiedichte von 0,1 Wh/kg (0,36 kJ/kg) bis 10 Wh/kg (36 kJ/kg), eine volumetrische Energiedichte von 10 kWh/m³ (36 kJ/L), einen Wirkungsgrad von 90 % bis 95 % und eine Lebensdauer von 1 Mio. Zyklen bzw. 10 Jahren (Sterner und Stadler 2014).

Die Energiedichte ist damit für die meisten Anwendungsfälle zu gering, als dass DSKs als alleinige Energiespeicher in Fahrzeugen in Frage kämen. In Kombination mit anderen Energiespeichern kann aber der hohe Wirkungsgrad sowie die hohe Zyklenfestigkeit genutzt werden, um rekuperierte Bremsenergie zu speichern, ohne dass die Lebensdauer eines anderen Speichers beeinträchtigt würde. Die spezifische Leistungsdichte ist höher als bei Akkumulatoren.

Akkumulator

Akkumulatoren werden zunehmend als Traktionsbatterien verwendet. Meist kommen Lithium-Ionen-Akkumulatoren zum Einsatz. Diese haben eine gravimetrische Energiedichte von 110 Wh/kg (396 kJ/kg) bis 190 Wh/kg (684 kJ/kg), eine volumetrische Energiedichte von 190 kWh/m³ (684 kJ/L) bis 375 kWh/m³ (1 350 kJ/L), einen Wirkungsgrad von 90 % bis 97 % und eine Lebensdauer von 400 bis 1 900 Zyklen bzw. 10 Jahren (Sternen und Stadler 2014).

Die Energiedichte von Akkumulatoren ermöglicht heute den Einsatz in vielen, vor allem leichten Fahrzeugen. Zum Senken von Volumen und Masse des Akkumulators, etwa um die Nutzlast zu maximieren, bestehen verschiedene Möglichkeiten:

- häufiges Laden (auch während der Fahrt oder bei kurzen Stopps durch Stromabnehmer oder Induktion)
- häufiges Austauschen des Akkumulators (Wechselbatteriesysteme)
- Kombination mit einem Energiespeicher höherer Energiedichte

Für das Laden oder Austauschen der Akkumulatoren ist geeignete Ladeinfrastruktur notwendig. Diese kann meist an ein vorhandenes Stromnetz angeschlossen werden, also auch dezentral zur Verfügung stehen. In diesem Fall können ggf. zusätzliche Wege zum Zweck der Energieaufnahme vermieden werden und das Fahrzeug ohne Anwesenheit einer Person geladen werden. Dies ist insofern wichtig, als der Ladevorgang deutlich länger als vergleichbare Tankvorgänge dauern kann. Zudem besteht die Option, dass der Akkumulator im Fahrzeug nicht nur Energie aus einem Stromnetz bezieht, sondern auch in dieses einspeist. Dies kann einige Netzdienstleistungen ermöglichen, erhöht aber die Zahl der Ladezyklen und senkt damit die Lebensdauer des Akkumulators.

Chemische Energiespeicher

Chemische Energieträger können hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichten aufweisen (siehe Tabelle 4). Kraftstoffe liegen überwiegend in flüssiger oder gasförmiger Form vor und erfordern geeignete Tanksysteme, welche durch ihre Masse die Energiedichte des Speichersystems im Vergleich zum reinen Energieträger vermindern. Für einige Kraftstoffe ist die Infrastruktur gut ausgebaut. Teils müssen für das Tanken

zusätzliche Wege in Kauf genommen werden und in der Regel ist während des Tankvorgangs die Anwesenheit der das Fahrzeug steuernden Person erforderlich.

Um die chemisch gespeicherte Energie für den Fahrzeugantrieb nutzbar zu machen, bedarf es eines Energiewandlers. In Frage kommen Verbrennungsmotoren, Gasturbinen, Stirlingmotoren, Freikolbenmotoren und Brennstoffzellen. Verbrennungskraftmaschinen müssen für die Stromerzeugung mit einem Generator kombiniert werden. Bei ihrem Einsatz in seriellen Hybridfahrzeugen werden Vorteile der als Antriebsmotor eingesetzten elektrischen Maschinen relativiert. Dass dies bei Brennstoffzellen in geringerem Maß der Fall sein kann, verdeutlicht Tabelle 5, in welcher Eigenschaften von Verbrennungsmotoren und SOFC-Systemen einander gegenübergestellt werden.

Tabelle 4: Anhaltswerte für Heizwerte möglicher Treibstoffe (ohne Tank)

	gravimetrische Energiedichte [MJ/kg]	volumetrische Energiedichte [MJ/L]	Quellenangabe
Wasserstoff i. N.	120	$10,8 \cdot 10^{-3}$	Specht 2007
Wasserstoff (700 bar)	120	5,6	Wikipedia 2015b
Wasserstoff (flüssig)	120	10,1	Wikipedia 2015b
Propan i. N.	46,4	$93,2 \cdot 10^{-3}$	Specht 2007
Propan (flüssig)	46,4	23,7	Wikipedia 2015a
Methan i. N.	50,0	$35,9 \cdot 10^{-3}$	Specht 2007
CNG (200 bar)	50,0	9,8	Wurster et al. 2014
LNG	50,0	19,5	Wurster et al. 2014
Dieselmotoren	42,7	35,9	Specht 2007
Motorenbenzin	42,9	31,3	Specht 2007
Methanol	19,9	16,2	Specht 2007
Ethanol	26,8	21,6	Specht 2007

Masse und Volumen des Energiewandlers hängen von der Leistung des Ausspeicherns ab. Um die Energiedichte eines Systems aus chemischem Energiespeicher und Energiewandler mit anderen Energiespeichern vergleichen zu können, muss die Nutzungsdauer bekannt sein: der Quotient aus Masse bzw. Volumen des Energiewandlers und von ihm bereitgestellter Energie wird kleiner, je länger er in Betrieb ist (vgl. Abschnitt 4.2).

Die maximale Ausspeicherleistung des chemischen Speichers eines rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Fahrzeugs (internal combustion engine vehicle, ICEV) ist direkt von der Vorgabe zur maximalen Antriebsleistung abhängig. Dies ist beim elektrisch angetriebenen Fahrzeug nicht der Fall, da z. B. für die Spitzenleistung im Antrieb auch Energie aus anderen Speichern bezogen werden kann. Dies ermöglicht eine kleinere Auslegung des Energiewandlers. Die zusätzliche Verwendung anderer Speicher bietet

sich auch aus dem Grund der Speicherung rekuperierter Bremsenergie an. Das Einspeichern in chemische Speicher während der Fahrt ist mit reversibel betriebenen Brennstoffzellen durch Elektrolyse zwar theoretisch möglich, die praktische Umsetzung aber u. a. aufgrund des vergleichsweise geringen Wirkungsgrades, welcher in der Größenordnung von 70 % liegt, unwahrscheinlich.

Tabelle 5: Gegenüberstellung von Eigenschaften von SOFC-Systemen und Verbrennungsmotor in Anlehnung an Tabelle 2

SOFC-System	Verbrennungsmotor
<ul style="list-style-type: none"> - Wirkungsgrad durch thermodynamischen Wirkungsgrad (vgl. Gleichung 3.1) begrenzt - geräuscharm – vermutlich leiser als Verbrennungsmotor - vibrationsarm (rotierende Komponenten in der Peripherie, z. B. Lüfter) - Potential für Lebensdauer je nach Betriebsstrategie hoch - kaum Wartung nötig (sobald Technik ausgereift) - guter Wirkungsgrad im Teillastbereich, aber Mindestleistung erforderlich - mäßige bis schlechte Schnellstartfähigkeit - dynamisches Verhalten problematisch, kombiniert mit Stromspeicher ausreichend - produziert Abgase, vgl. Tabelle 1. Laut Hoogers (2003) würde ein SOFC-Kraftwerk im Vergleich zu einem GuD-Kraftwerk für die Erzeugung derselben Strommenge geringere Emissionen jeden Schadstoffs aufweisen. So wären die spezifischen NO_x-Emissionen mit 0,03 g/kWh_e um 96 % geringer, Partikel würden nicht emittiert. Dies legt nahe, dass auch Vorteile gegenüber Verbrennungsmotoren bestehen. - Energiewandlung in elektrische Arbeit, diese kann in Stromspeicher eingespeist oder anders genutzt werden, Elektromotor für Umwandlung in mechanische Arbeit erforderlich 	<ul style="list-style-type: none"> - theoretischer Wirkungsgrad durch Carnot-Wirkungsgrad begrenzt - vermutlich lauter als SOFC-System - prinzipbedingte Bewegungen erzeugen Vibrationen - mäßige Lebensdauer - regelmäßige Wartung erforderlich - schlechter Teillastwirkungsgrad - gute Schnellstartfähigkeit - gutes dynamisches Verhalten - produziert Abgase, teils großer Aufwand für Abgasbehandlung erforderlich - Energiewandlung in mechanische Arbeit, diese kann direkt zum Fahrzeugantrieb genutzt werden, für Speicherung in Stromspeicher oder für Nutzung in elektrischen Verbrauchern Generator erforderlich

SOFC-System	Verbrennungsmotor
- Energieversorgung mit Brennstoff	- Energieversorgung mit Brennstoff
- Abführen der Abwärme auf hohem Temperaturniveau	- Abführen der Abwärme auf hohem Temperaturniveau
- spezifische Leistungsdichte nach Stand der Technik gering	- hohe spezifische Leistungsdichte
- hohe Brennstoffflexibilität, bestverfügbare Treibstoffe Benzin und Diesel jedoch nicht optimal	- hohe Brennstoffflexibilität, Kraftstoffinfrastruktur gut ausgebaut
- geringe Marktreife	- ausgereifte Technik

Der im Fahrzeug aus chemischer Energie erzeugte elektrische Strom könnte über geeignete Infrastruktur ins Stromnetz eingespeist werden. Aus Sicht des Stromsektors könnte das Fahrzeug dadurch zum Bestandteil eines komplexen Stromspeichers werden: Power-to-Gas- oder Power-to-Liquid-Anlagen würden zum Einspeichern genutzt. Die erzeugten Energieträger könnten lange verlustfrei gespeichert werden, bevor sie z. B. mittels Brennstoffzellen wieder zur Erzeugung von elektrischem Strom verwendet würden (Ausspeichern).

Diese Langzeitspeicherfähigkeit ist für die Versorgungssicherheit entscheidend und kann nur von wenigen (nicht auf fossilen oder nuklearen Energieträgern basierenden) Techniken gewährleistet werden. Für den Umgang mit im Rahmen der fortschreitenden Energiewende zunehmend auftretenden Residuallasten steht eine Reihe von Flexibilitätsoptionen, einschließlich sehr effizienter Kurzzeitspeicher, zur Verfügung. Dies führt dazu, dass die Zahl von Volllaststunden, mit denen Langzeitspeicher jährlich aus-speichern, vergleichsweise gering sein wird. Da die Leistungskosten von Langzeitspei- chern hoch sind (Fürstenwerth et al. 2014), wäre es sehr vorteilhaft, für das Ausspeichern auf ohnehin in Fahrzeugen vorhandene Aggregate zurückgreifen zu kön- nen – insbesondere, wenn diese hohe Wirkungsgrade aufweisen (vgl. Kapitel 5).

3.3.3 PEMFC, SOFC

In den letzten Abschnitten wurden Aspekte aufgeführt, welche für den Einsatz von Brennstoffzellen in Fahrzeugen sprechen. Dabei werden in der Regel PEMFCs in Erwä- gung gezogen. Mittlerweile sind Brennstoffzellenfahrzeuge mit dieser Technik in Serien- fertigung. SOFCs als Antriebsaggregat einzusetzen, wird dagegen nur selten erwogen (Beispiele sind in Abschnitt 3.2 aufgeführt). Als Gründe dafür werden von Rajashekara et al. (2006) mangelnde Schnellstartfähigkeit sowie geringe Lastgradienten von SOFC- Systemen genannt. Aguiar et al. (2007) führen zudem mangelnde Zyklenfestigkeit von SOFCs und eine typischerweise geringere Leistungsdichte von SOFC- gegenüber PEMFC-Stacks an. Angemerkt wird aber, dass die Nachteile von SOFCs durch Anpas- sung der Betriebsstrategie des Fahrzeugs, durch Kombinieren des SOFC-Systems mit

anderen Stromquellen, oder durch Anpassungen bei der SOFC selbst – genannt wird die Absenkung ihrer Temperatur – vermieden werden können.

Brennstoffe

PEMFCs werden mit Wasserstoff hoher Reinheit betrieben. Die Konzentration von Kohlenstoffmonoxid etwa sollte deutlich unter 100 ppm liegen, da es als Katalysatorgift wirkt (Winkler 2002). Bei Wasserstofferzeugung aus Kohlenwasserstoffen im Fahrzeug würde die Reformatgasaufbereitung daher einen großen Aufwand erfordern. Sollten sich HT-PEMFCs, betrieben bei Temperaturen über 100 °C, durchsetzen, könnte dieser Aufwand verringert werden, da diese eine deutlich höhere CO-Toleranz von etwa 2 Vol.-% aufweisen (Steinberger-Wilckens und Mubbala 2012).

Die geringe Dichte und der hohe Diffusionskoeffizient des Wasserstoffs erfordern aufwändige Tanksysteme. Bei gasförmigem Wasserstoff sind Drücke von mehreren Hundert bar notwendig, der Energiebedarf für die Kompression auf einen Druck von 700 bar beträgt mehr als 10 % des Energieinhalts des Wasserstoffs. Für die Verflüssigung von Wasserstoff ist etwa ein Drittel des Heizwertes von Wasserstoff erforderlich (Hoogers 2003). Der Tank muss thermisch gut isoliert sein, das Verdampfen von Wasserstoff ist jedoch nicht zu vermeiden und führt zu Verlusten, wenn der Wasserstoff nicht genutzt werden kann. Je nach Tanksystem besteht die Gefahr von Wasserstoffversprödung.

Die Wasserstoffinfrastruktur ist noch nicht gut ausgebaut. In Deutschland gab es Ende Januar 2016 insgesamt 34 Wasserstofftankstellen, davon 21 öffentliche (TÜV SÜD AG 2016). In Deutschland und anderen Ländern wird jedoch angestrebt, die Zahl der Wasserstofftankstellen stark zu erhöhen, in Deutschland wird die Zahl 400 für das Jahr 2023 angestrebt (NOW GmbH 2015). Zudem könnten sich Synergieeffekte ergeben, wenn in der Grundstoffindustrie und im Stromsektor zunehmend auf fossile Rohstoffe verzichtet und verstärkt auf Wasserstoff gesetzt wird. So werden von Weigel (2014) sowohl die SOFC als auch die PEMFC zu den besonders interessanten Wasserstoff-Querschnittstechnologien gezählt. PEMFCs stoßen ausschließlich Wasser bzw. Wasserdampf aus, was als unbedenklich angesehen wird. Dies trägt zu ihrem positiven Image bei.

Die hohen Temperaturen der SOFC können zur internen oder externen Reformierung von Treibstoffen genutzt werden und Kohlenstoffmonoxid stellt für den Katalysator kein Problem dar, sondern kann im Gegenteil für die Stromerzeugung genutzt werden. Daher besteht eine große Brennstoffflexibilität bei geringer Komplexität des Systemaufbaus (Aguiar et al. 2007). Der Aufwand für das Speichern des Treibstoffs hängt vom jeweiligen Treibstoff ab. Infrastruktur für geeignete Treibstoffe ist teilweise bereits vorhanden. Auch die Emissionen werden durch den verwendeten Treibstoff beeinflusst. Sie sind voraussichtlich geringer als bei Verbrennungsmotoren (siehe Abschnitt 3.1.8 und Tabelle 5), jedoch stellt dies nicht ihre dauerhafte Akzeptanz sicher. CO₂-Emissionen gelten als akzeptabel, sofern ihre Klimaneutralität gewährleistet ist.

Die Herstellung von Biotreibstoffen und strombasierten Treibstoffen sind Ansätze, auf fossilen Rohstoffen basierende Energieträger wie Dieselkraftstoff, Motorenbenzin, Autogas (LPG, Liquefied Petroleum Gas) oder Erdgas zu ersetzen. Für die Herstellung von strombasierten Treibstoffen wird zunächst mittels Elektrolyse Wasserstoff gewonnen. Elektrolyseure stellen die technische Umkehrung von Brennstoffzellen dar, teilweise können für beide Zwecke dieselben Aggregate verwendet werden (Schmid 2016). Auch hier kann es bei zunehmender Nutzung von Brennstoffzellen im Verkehrsbereich zu Synergieeffekten kommen.

Der so erzeugte Wasserstoff kann sowohl in PEMFCs, als auch in SOFCs verwertet werden. Wird der Wasserstoff in das bereits vorhandene Erdgasnetz eingespeist, bietet sich eher der Einsatz von SOFCs an. Dies gilt auch für den Fall, dass der Wasserstoff zur Erzeugung von Methan, Methanol, Benzin, Diesel, Kerosin, Wachs oder Dimethylether (DME) (Sternner und Stadler 2014) genutzt wird. Möglicherweise könnte Wasserstoff auch zum Erzeugen von auf Stickstoff basierenden Energieträgern wie Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) genutzt werden (Grinberg Dana et al. 2015). Dafür wäre weniger CO₂ nötig, die Eignung als Kraftstoff und Brennstoff für SOFCs wäre jedoch noch zu prüfen.

Für die Umwandlung von Wasserstoff in andere strombasierte Treibstoffe spricht, dass das Transportieren und Lagern einfacher wird. Sollen die Elektrolyseure mit möglichst vielen Volllaststunden betrieben werden, könnten sie auf dem Meer („Energieschiffe“, Sternner und Stadler 2014) oder in Gegenden mit besonders hoher Sonneneinstrahlung betrieben werden. Dies hätte unter Umständen lange Transportwege zur Folge, welche je nach Energieträger mit unterschiedlich hohen Transportverlusten behaftet wären.

Bei Biotreibstoffen handelt es sich in der Regel nicht um Wasserstoff. Die Ausnahme bildet Biowasserstoff, welcher mittels Algen oder Bakterien erzeugt wird. Im Jahr 2014 betrug der Endenergieverbrauch an Biotreibstoffen in Deutschland 32 373 GWh, gut 5 % des Endenergieverbrauchs im Verkehr (Nieder et al. 2015). Auch wenn die meisten der von Runkel et al. (2015) untersuchten Studien trotz Nutzungskonkurrenz bei Biomasse mit einer Steigerung der Energiebereitstellung im Verkehr aus Biotreibstoffen rechnen und der Endenergiebedarf insgesamt sinkt, ist von einem vergleichsweise kleinen Anteil der Energiebereitstellung aus Biomasse im Verkehr auszugehen. Da elektrischer Strom zunehmend direkt im Verkehr genutzt werden wird, könnte den Biotreibstoffen zunehmende Bedeutung bei den verbleibenden Treibstoffen zukommen.

Es ist also anzunehmen, dass es in Zukunft neben Wasserstoff relevante Mengen an regenerativ erzeugten Kohlenwasserstoff-basierten Treibstoffen geben wird. Mit diesen ließen sich besser SOFCs als PEMFCs betreiben.

Wassermanagement

Das Wassermanagement stellt eine Herausforderung für PEMFCs dar: die Membran muss feucht gehalten werden, gleichzeitig muss das Reaktionsprodukt Wasser abgeführt

werden, was im gasförmigen Zustand besser gelingt und die Brenngaszufuhr nicht behindert.

In SOFC-Stacks treten keine Flüssigkeiten auf. Wassermanagement kann jedoch für die Reformierung eine Rolle spielen. Da das Mitführen eines Wassertanks für diesen Zweck eine Verminderung der Nutzlast bedeuten würde, ist in Fahrzeugen die Verwendung von Wasser als Produkt aus Oxidationsreaktionen zu bevorzugen. Dadurch wird jedoch die Betriebsführung komplexer, da es sich um ein rückgekoppeltes System handelt.

Abwärme/Temperaturen

PEMFCs werden in der Regel bei Temperaturen unter 100 °C betrieben. Der für das Abführen der Abwärme notwendige Luftvolumenstrom ist vergleichsweise groß und steigt mit zunehmender Außentemperatur. Hohe Außentemperaturen können daher die Performance von PEMFC-Systemen beeinträchtigen. Die Abwärme kann zum Beheizen des Fahrzeugs genutzt werden.

In SOFCs wird die Abwärme vor allem mit dem Kathodenabgas aus dem Stack abgeführt. Die hohe Betriebstemperatur von SOFCs eröffnet vielfältige Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme (siehe Kapitel 2). Das SOFC-System muss eine Wärmeisolierung aufweisen, die auch den Anforderungen von Fahrzeugen gerecht wird.

Dass SOFC-Systeme im Vergleich zu PEMFC-Systemen höhere Wirkungsgrade erreichen können (Rajashekara et al. 2006), kann teilweise mit den Erfordernissen und Möglichkeiten der unterschiedlichen Abwärme-Temperaturniveaus beider Brennstoffzellentypen erklärt werden.

Lebensdauer

Die kalendarische Lebensdauer von SOFCs gilt als höher als diejenige von PEMFCs (Stenger 2014). Bei der zyklischen Lebensdauer ist es umgekehrt, da sich Thermo- und Redoxzyklen besonders negativ auf die SOFC auswirken können. Die in Kapitel 2 umrissene Vielfalt an Gestaltungsmöglichkeiten von SOFC-Systemen erlaubt das gezielte Verbessern bestimmter Systemeigenschaften. So lassen etwa mikrotubulare SOFCs eine erhöhte Zyklenfestigkeit erwarten.

Die Lebensdauer von Brennstoffzellen kann durch Anpassung der Betriebsstrategie erhöht werden. In Abschnitt 4.2 werden für die SOFC Vorschläge genannt.

Materialien

In der Regel wird in PEMFCs Platin und in SOFCs Nickel als Katalysator verwendet, sodass die Kosten für den Katalysator bei SOFCs geringer sind. Es gibt Bestrebungen,

den Platinbedarf von Brennstoffzellen weiter zu verringern oder ganz auf diesen Katalysator zu verzichten.

Hohe Betriebstemperaturen schränken die Auswahl an geeigneten Materialien ein, so dass es Anstrengungen gibt, die Betriebstemperaturen von SOFCs und damit auch ihre Materialkosten abzusenken. Zudem müssen laut Krewitt (2004) vor allem Chrom, Lanthan, Yttrium und Zirkonoxid bei der weiteren Entwicklung von SOFCs kritisch betrachtet werden, da der Bedarf der Brennstoffzellen an diesen Materialien hoch sein könnte, die Reserven gering sind oder es konkurrierende Einsatzfelder gibt.

Die Europäische Kommission schätzt das Versorgungsrisiko in der Europäischen Union für Seltene Erden als hoch ein (European Commission 2010).

Leistungsdichte

Die Leistungsdichte von PEMFC-Stacks ist für den Einsatz in Fahrzeugen geeignet, was sich an der Serienproduktion entsprechender Fahrzeuge zeigt. In Abschnitt 3.1.3 wird auf die Leistungsdichte von SOFC-Systemen eingegangen. Da der Entwicklungsschwerpunkt bei ihnen bisher auf stationären Systemen lag, stand die Minimierung von volumetrischer und gravimetrischer Leistungsdichte nicht im Vordergrund. Zudem wird der PEMFC ein Entwicklungsvorsprung von fünf Jahren zugeschrieben (Stenger 2014). Der Nachweis, dass die Leistungsdichte von SOFC-Systemen für den Einsatz als Antriebsaggregat ausreicht, muss noch erbracht werden.

Schnellstartfähigkeit und Lastgradienten

Aufgrund der niedrigen Betriebstemperaturen sind PEMFC-Systeme schnellstartfähig und zu schnellen Laständerungen in der Lage. Die SOFC hat hier Nachteile (siehe Abschnitte 3.1.2 und 3.1.5). In Abschnitt 4.2 wird darauf eingegangen, wie diesen begegnet werden kann.

4 SOFC-basierte Antriebskonzepte für Fahrzeuge

In diesem Kapitel wird erörtert, wie SOFCs in Antriebssysteme eingebunden werden könnten. Zunächst werden in Abschnitt 4.1 allgemein Kombinationsmöglichkeiten mit anderen Antriebskomponenten diskutiert und auf die in dieser Arbeit verwendete Systematik für die Benennung von Antriebskonzepten eingegangen. Vorausgesetzt wird, dass die SOFC immer mit einer elektrischen Maschine kombiniert wird.

Unter Berücksichtigung des Stands der Technik von SOFCs wird in Abschnitt 4.2 eine Betriebsstrategie für SOFC-Systeme in Fahrzeugen vorgeschlagen und deren Vor- und Nachteile diskutiert. In Abschnitt 4.3 werden die Eigenschaften des Antriebsstrangs, die sich aus den Antriebskomponenten und der vorgeschlagenen Betriebsstrategie ergeben, den Anforderungen, die an Antriebssysteme gestellt werden, gegenübergestellt.

4.1 Systematik: Kombinationsmöglichkeiten von SOFC, Verbrennungsmotor und Stromspeicher

In Kapitel 3 wurde deutlich, dass Kombinationen aus Energiespeichern und -wandlern Vorteile für Antriebskonzepte bieten können. In diesem Abschnitt soll darauf eingegangen werden, welche Optionen diesbezüglich für die SOFC bestehen. In Abbildung 4.1 werden anhand eines Dreiecksdiagramms die Kombinationsmöglichkeiten aus Brennstoffzellen, Verbrennungsmotoren und Stromspeichern aufgezeigt. Es wird abgebildet, wie groß jeweils der Anteil der bereitgestellten Antriebsenergie ist. Dieser Wert ist neben der Dimensionierung der Komponenten auch vom Lastprofil sowie von der Betriebsstrategie abhängig. Dennoch sind Rückschlüsse auf das Antriebskonzept möglich.

In den Ecken des Dreiecksdiagramms befinden sich die drei Grundkonfigurationen, bei welchen die gesamte Antriebsenergie von nur einer Speicher- oder Wandlertechnik bereitgestellt wird. In allen anderen Fällen handelt es sich um Kombinationen. Fahrzeuge mit mindestens zwei Energiewandlern und zwei Energiespeichersystemen im Antriebssystem werden nach einer oft verwendeten Definition (vgl. z. B. UNECE Transport Division 2005) als „Hybridfahrzeuge“ bezeichnet. Diese Definition trifft auf die Kombinationen im Dreiecksdiagramm zu. Die Ausnahme bildet das System Brennstoffzelle-Verbrennungsmotor, wenn für beide auf denselben Tank zugegriffen wird.

Hybridelektrische Fahrzeuge (hybrid electric vehicles, HEVs) beziehen die Antriebsenergie aus einem chemischen Energieträger und einem Stromspeicher (ebda.). Jedoch existiert bei der Benennung von Antriebssystemen keine einheitliche Systematik, oft werden Fahrzeuge nur dann als HEV bezeichnet, wenn sie neben einem Stromspeicher einen Verbrennungsmotor (internal combustion engine, ICE) aufweisen. In den meisten Fällen werden bei Verwendung des Begriffs autarke hybridelektrische Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor gemeint, also solche, die nicht ans Stromnetz angeschlossen werden können. Je nach Definition sind Plug-in-hybridelektrische Fahrzeuge (plug-in hybrid

electric vehicles, PHEVs), bei welchen der Stromspeicher mit einem Stromnetz verbunden werden kann, eine besondere Form von HEVs oder von ihnen abzugrenzen. Die Abkürzung ICE-HEV bzw. ICE-PHEV ist nur gebräuchlich, wenn Hybridfahrzeuge mit Verbrennungsmotor ähnlichen Konzepten, beispielsweise mit Brennstoffzellen, gegenübergestellt werden (z. B. Thomas 2008).

Als Brennstoffzellenfahrzeug (fuel cell vehicle, FCV) können alle Fahrzeuge bezeichnet werden, bei denen sich eine Brennstoffzelle im Antriebsstrang befindet. Meist sind Fahrzeuge gemeint, denen chemische und keine elektrische Energie zugeführt wird. Eingeschlossen sind dabei auch Fahrzeuge mit Stromspeicher wie der Honda FCX Clarity und der Toyota Mirai, welche als autarke hybridelektrische Fahrzeuge bezeichnet werden könnten. Die Hybridisierung des Antriebsstrangs wird bei Brennstoffzellenfahrzeugen dann herausgehoben, wenn dem Stromspeicher eine besondere Rolle zukommt – etwa weil er aus dem Stromnetz geladen wird. Hierfür ist die Abkürzung „FCHV“ gebräuchlich. Die Eigenschaft, ans Stromnetz angeschlossen werden zu können, wird bei Brennstoffzellenfahrzeugen in der Regel nicht hervorgehoben. Diese Möglichkeit kann auch bestehen, ohne dass das Fahrzeug über das Stromnetz geladen wird. So ist der Toyota Mirai in der Lage, als Notstromaggregat zu fungieren. Die Abkürzungen „FC-HEV“ und „FC-PHEV“ werden selten verwendet.

Für diese Arbeit erscheinen sie jedoch als geeignet, da sie eine Erweiterung auf die Kombination aus Brennstoffzelle und Verbrennungsmotor zulassen: „FC-ICE-HV“ oder wenn ein Stromspeicher vorhanden ist, nach obiger Definition „FC-ICE-HEV“. Ein „FC-ICE-PHEV“ bezeichnet ein FC-ICE-HEV mit Plug-In-Funktion. Der Ausdruck „Plug-In“ kann im Wortsinn gebraucht werden: dann ist nur gemeint, dass das Fahrzeug an ein Stromnetz angeschlossen werden kann. Alternativ kann – wie beim ICE-PHEV üblich – gemeint sein, dass der Stromspeicher regelmäßig aus einem Stromnetz geladen wird. Dies ließe Rückschlüsse auf den Hybridisierungsgrad (s. u.) des FC-PHEVs zu. Diese Unterscheidung ist für diese Arbeit jedoch nicht relevant.

Darüber hinaus kann die Art der Brennstoffzelle genannt werden: für SOFCs lautet ein Beispiel „SOFC-ICE-HEV“. Diese Systematik erlaubt es, den Brennstoffzellenfahrzeugen über das in Abbildung 4.1 gezeigte Dreiecksdiagramm Antriebskonzepte zuzuordnen.

Da es Freiheitsgrade in der Energiebereitstellung der Komponenten gibt, ist über das Dreiecksdiagramm keine genaue Aussage zur Auslegung des Antriebskonzeptes möglich. Hierfür eignet sich der Hybridisierungsgrad HG , welcher aus dem Verhältnis von Leistungen berechnet wird. Es gibt mehrere Definitionen. Wilhelm (2010) stellt vier Definitionen für den Hybridisierungsgrad von Brennstoffzellenfahrzeugen vor. Daran angelehnt wird in dieser Arbeit die folgende, allgemeinere Definition für den Hybridisierungsgrad eines Brennstoffzellenfahrzeugs vorgeschlagen:

$$HG = \frac{\sum P_{Sp,out,max} - P_{BZ,max}}{\sum P_{Sp,out,max}}. \quad (4.1)$$

Als maximale Ausspeicherleistung eines Speichers $P_{Sp,out,max}$ wird die Leistung eines Brennstoffzellensystems, Verbrennungsmotors oder Stromspeichers, wie beispielsweise Akkumulators, bezeichnet, welche dieser maximal abgeben kann.

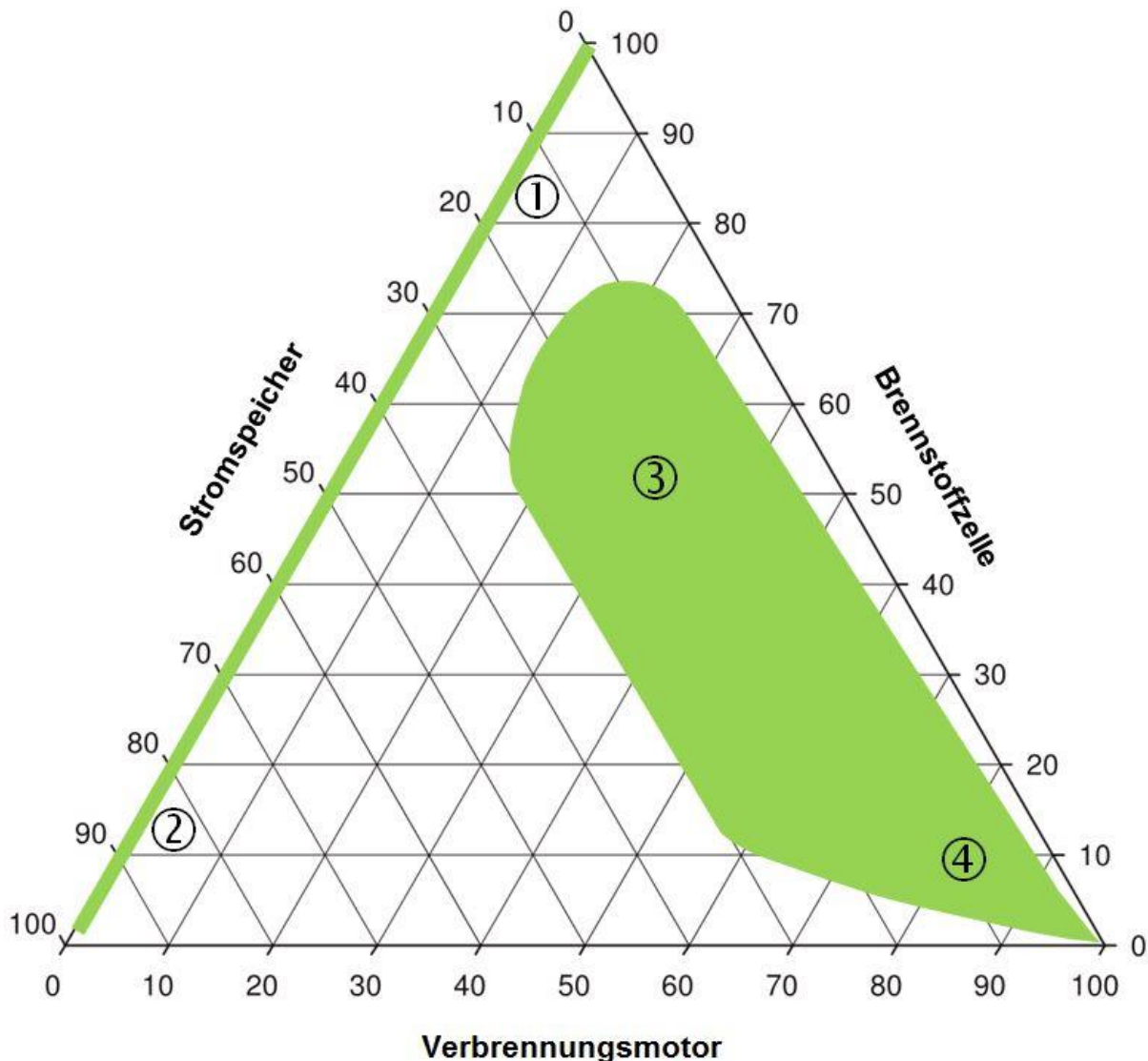


Abbildung 4.1: Kombinationsmöglichkeiten von Brennstoffzellen mit Verbrennungsmotoren und Stromspeichern in Fahrzeugen: anteilige Bereitstellung von Energie für ein bestimmtes Fahrprofil, Zahlenangaben in Prozent. Grün eingefärbte Bereiche sind möglicherweise besonders gut geeignet

In Abbildung 4.1 ist durch farbliche Kennzeichnung eine Eingrenzung der Kombinationsmöglichkeiten von Brennstoffzelle, Stromspeicher und Verbrennungsmotor auf die Kombinationen vorgenommen, welche sich als besonders sinnvoll erweisen könnten. Dies wird im Folgenden erläutert.

Die Machbarkeit von nicht nach Definition von UNECE Transport Division (2005) hybridisierten Brennstoffzellenfahrzeugen wird beispielsweise von Martinez et al. (2015) gezeigt. Jedoch kann laut Wilhelm (2010) durch die Kombination des Brennstoffzellensystems mit einem Stromspeicher die Dynamik des Antriebssystems

erhöht, die Startzeit verkürzt, das Brennstoffzellensystem kleiner ausgelegt und Bremsenergie rekuperiert werden. Wird der Stromspeicher extern geladen, können zudem Emissionen gesenkt werden. Als nachteilig werden unter anderem die Komplexität des Gesamtsystems, sein großer Platzbedarf und das komplexe Regelungssystem genannt (ebda.).

Im Bereich ① in Abbildung 4.1 wird der Großteil der Antriebsenergie vom Brennstoffzellensystem bereitgestellt. Dies deutet auf einen kleinen Hybridisierungsgrad nach Gleichung 4.1 hin. Der Stromspeicher wird durch die Brennstoffzelle oder durch Bremsenergieerückgewinnung geladen. Bei Lastspitzen wird das Brennstoffzellensystem durch den Stromspeicher unterstützt, jedoch muss es in der Regel dynamisch betrieben werden.

Im Bereich ② wird der Großteil der Antriebsenergie vom Stromspeicher bereitgestellt. Das Fahrzeug wird extern geladen, das Brennstoffzellensystem dient als Range Extender (je nach Anwendungsfall kann auch die Bereitstellung von Wärme im Vordergrund stehen). Daher steht eine hohe Energie- bzw. Leistungsdichte von Tank- und Brennstoffzellensystem im Vordergrund. Die Anforderungen an das dynamische Verhalten sind dagegen gering. Zwischen den Bereichen ① und ② besteht ein fließender Übergang. Von Wilhelm (2010) werden mehrere Bezeichnungen für unterschiedliche Konfigurationen vorgestellt.

Soll die Phlegmatisierung eines Brennstoffzellensystems durch einen hohen Hybridisierungsgrad erreicht werden, kann dies insbesondere bei Fahrzeugen mit hohem Energiebedarf einen schweren Stromspeicher erfordern. Eine Alternative stellen Verbrennungsmotoren dar. Diese sind schnellstartfähig, lassen sich dynamisch betreiben und weisen eine hohe Leistungsdichte auf. Fahrzeuge mit diesem Antriebskonzept sind in Abbildung 4.1 durch den Bereich ③ gekennzeichnet: FC-ICE-PHEVs mit großem Stromspeicher sind unwahrscheinlich, da dies die Nutzlast wieder verringern würde. Auch würden die Nachteile des Verbrennungsmotors seinen Einsatz nicht rechtfertigen, wenn er nur einen geringen Anteil der Antriebsenergie bereitstellen würde. Für Bremsenergieerückgewinnung und Bordstromversorgung ist es jedoch oft sinnvoll, einen Stromspeicher mitzuführen. Zudem wird dieser dem Verbrennungsmotor hinsichtlich Startzeit und dynamischem Verhalten überlegen sein, weshalb er umso größer sein sollte, je größer die Leistung des Brennstoffzellensystems ist. Der Verbrennungsmotor kann dann weniger dynamisch betrieben und z. B. innerorts ganz abgeschaltet werden, um dort die Emissionen zu minimieren.

Im Bereich ④ dominiert der Verbrennungsmotor. Hier ist vorstellbar, dass das Brennstoffzellensystem primär als APU dient und auch bei ausgeschaltetem Antriebsmotor elektrischen Strom bereitstellt. Sollte es dabei temporär zu Überschüssen kommen, etwa weil der Energiebedarf für Kühlung aufgrund niedriger Umgebungstemperatur gering ist, kann in einen Stromspeicher eingespeichert werden. Üblicherweise ist in Fahrzeugen ein Stromspeicher für die Bordstromversorgung vorhanden, der mit einer Lichtmaschine verbunden ist. Wird diese beispielsweise durch einen Startergenerator ersetzt, kann der

im Brennstoffzellensystem erzeugte Strom zum Fahrzeugantrieb genutzt werden. Der Übergang vom Bereich ③ zum Bereich ④ ist fließend.

Die Kombination aus Brennstoffzelle und Stromspeicher bietet technische Vorteile gegenüber dem Verbrennungsmotor. Der derzeitige Stand der Technik sowie die geringere Marktreife können jedoch zu Einschränkungen, z. B. hinsichtlich der Betriebsstrategie der Brennstoffzelle (vgl. Abschnitt 4.2), führen, welche die Kombination mit einem Verbrennungsmotor als sinnvoll erscheinen lässt. Dieser ist technisch ausgereift und aufgrund von Massenproduktion vergleichsweise günstig. Langfristig könnten sich FC-ICE-HEVs jedoch als Übergangslösung erweisen.

4.2 Dauerbetrieb von SOFCs in Fahrzeugen

Die in Abschnitt 4.1 aufgezeigten Kombinationsmöglichkeiten von Brennstoffzellen mit anderen Antriebsaggregaten führen zu zusätzlichen Freiheitsgraden bei der Energiebereitstellung (Wilhelm 2010). So kann für SOFCs eine an ihren Stand der Technik (vgl. Abschnitt 3.1) angepasste Betriebsstrategie gewählt werden. Im Folgenden wird eine 1-Punkt-Strategie im Dauerbetrieb unter mehreren Gesichtspunkten diskutiert.

Diese wird neben weiteren Betriebsstrategien auch von Brett et al. (2006b) vorgeschlagen und untersucht. Während dort das Ziel im Vordergrund steht, das Fahrzeug trotz großen Akkumulators vom Stromnetz unabhängig zu betreiben, wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass der Anschluss des Fahrzeugs ans Stromnetz die Betriebsstrategie erst ermöglicht: Stromspeicher können geladen werden und von der SOFC erzeugter Strom kann in ein Stromnetz eingespeist werden. So müssen lange Standzeiten des Fahrzeugs bei der Auslegung des Antriebssystems nicht berücksichtigt werden.

Thermozyklen

Durch den Dauerbetrieb der SOFC werden Thermozyklen vermieden. Dies kann sich je nach Ausführung der SOFC sehr positiv auf die Lebensdauer der Brennstoffzelle auswirken und stellt wohl den wichtigsten Vorteil dieser Betriebsstrategie dar.

Es bestehen jedoch auch andere Möglichkeiten, Absenkungen der Betriebstemperatur der Brennstoffzelle zu vermeiden oder in einem unschädlichen Rahmen zu halten. Dazu gehören Teillast- oder Standby-Betrieb (Brett et al. 2006b), zyklisches An- und Abschalten (Warmstarts) und Laden eines Stromspeichers im Fahrzeug. Diese Optionen könnten beispielsweise zum Einsatz kommen, wenn das Fahrzeug längere Zeit fern vom Stromnetz einen geringen Strombedarf hat oder wenn bei ans Verbundnetz angeschlossenem Fahrzeug die Nachfrage nach elektrischer Energie, etwa aufgrund hoher Einspeisung aus Windenergieanlagen, sehr gering ist. Im letztgenannten Fall könnte eine Möglichkeit sein, das abgeschaltete SOFC-System mit kostengünstigem, überwiegend regenerativ erzeugtem Strom zu heizen. Von der SOFC erzeugten elektrischen Strom

als Wärme abzugeben, stellt eine Notlösung dar. Es ist denkbar, dass SOFCs zukünftig eine größere Zyklenfestigkeit aufweisen. In diesem Fall würde das Aufrechterhalten hoher Betriebstemperaturen an Bedeutung verlieren.

Startzeit

Bei konsequenter Umsetzung des Dauerbetriebs muss das SOFC-System nur einmal eingeschaltet werden. In diesem Fall ist die Dauer nicht entscheidend, sodass das Anfahren des SOFC-Systems sehr schonend erfolgen kann.

Daneben gibt es weitere Ansätze, mit der vergleichsweise langen Startzeit von SOFCs umzugehen:

- Warmstarts nehmen weniger Zeit in Anspruch als Kaltstarts
- Einschalten des Systems rechtzeitig vor Fahrtbeginn, z. B. mittels Telekommunikation
- in Hybridfahrzeugen kann die benötigte Energie während des Startvorgangs des SOFC-Systems von Stromspeichern oder Verbrennungsmotoren bereitgestellt werden (Brett et al. 2006b)
- Verkürzung der Startzeiten von SOFC-Systemen

Teillast und Dynamik

Da als Betriebsstrategie des SOFC-Systems eine 1-Punkt-Strategie im Dauerbetrieb diskutiert wird, ist die Teillastfähigkeit von SOFC-Systemen nicht relevant. Es besteht die Möglichkeit, den einen Betriebspunkt ohne Berücksichtigung anderer möglicher Betriebspunkte zu optimieren. Das Regelungssystem des Antriebssystems verliert durch die 1-Punkt-Strategie möglicherweise an Komplexität. Jedoch ist zu beachten, dass die SOFC mindestens einmal eingeschaltet werden muss. Das Genannte gilt auch für den Reformer, sofern vorhanden.

Wird das SOFC-System mit einer 1-Punkt-Strategie betrieben, muss das Fahrzeug in der Regel hybridisiert sein. Je größer die Leistung des SOFC-Systems ist, desto höhere Anforderungen werden an das dynamische Verhalten anderer Antriebskomponenten gestellt.

Der Nickelkatalysator kann bei Leistungsspitzen oxidiert werden. Redoxzyklen treten im stationären Betrieb der SOFC nicht auf, was sich positiv auf die Lebensdauer auswirkt.

Wirkungsgrad

Ein hoher elektrischer Wirkungsgrad des SOFC-Systems ist eines der wichtigsten Argumente für seinen Einsatz in Fahrzeugen. Er sollte also mindestens so groß sein wie bei

konkurrierenden Verbrennungsmotoren. Es ist jedoch nicht selbstverständlich, dass sich die in stationär eingesetzten SOFCs erreichten Wirkungsgrade auch in Fahrzeugen erreichen lassen, da hier zusätzliche Anforderungen berücksichtigt werden müssen, etwa bezüglich der Leistungsdichte.

Der 1-Punkt-Betrieb bietet gute Voraussetzungen, einen hohen Wirkungsgrad des SOFC-Systems zu erreichen (s. o.). Jedoch kann der Gesamtwirkungsgrad des Antriebssystems beeinträchtigt werden, wenn elektrische Energie aus der Brennstoffzelle verlustbehaftet in Stromspeichern zwischengespeichert werden muss. Diese Verluste sind stark vom verwendeten Stromspeicher sowie vom Lastprofil des Fahrzeugs abhängig.

Angeschlossen an das Verbundnetz, konkurriert das Brennstoffzellensystem mit anderen Stromerzeugern. Die höchsten elektrischen Wirkungsgrade werden heute von GuD-Kraftwerken erreicht, der Höchstwert liegt bei 61,5 % (Siemens AG 2016).

Masse

Die Masse des SOFC-Systems kann durch die 1-Punkt-Strategie minimiert werden, wenn das Ziel lautet, eine bestimmte Energiemenge in einem festgelegten Zeitintervall zur Verfügung zu stellen. Diese Aufgabe stellt sich, wenn das SOFC-System als Range Extender dienen soll. Die Kombination aus SOFC-System und gefülltem Tank muss dann leichter als der durch sie ersetzte Stromspeicher sein. Dass dies nicht immer der Fall ist und dass eine starke Zeitabhängigkeit besteht, verdeutlicht folgende Überschlagsrechnung:

Ein Lithium-Ionen-Akkumulator habe eine Kapazität von 100 kWh, wovon 80 % genutzt werden. Die Masse des Akkumulators beträgt bei einer angenommenen Energiedichte von 180 Wh/kg (vgl. Abschnitt 3.3.2) 555,5 kg. Ein SOFC-System mit einer Leistungsdichte von 18 W/kg (vgl. Abschnitt 3.1.3) soll in Zeitintervallen unterschiedlicher Länge ebenfalls 80 kWh elektrischer Energie bereitstellen. Der Wirkungsgrad betrage 35 %. Dies führt zu einem Verbrauch des Treibstoffs CNG von 16,5 kg bzw. 84,4 L, wenn der Druck im Tank 200 bar beträgt (vgl. Tabelle 4). Die Masse zweier dafür geeigneter gefüllter 50-L-Stahltanks wird zu insgesamt 140 kg angenommen (Aguiar et al. 2007). In Tabelle 6 sind die Ergebnisse dargestellt. Erst nach einer Betriebszeit von annähernd 10,75 h ist das System aus SOFC-System/Tank leichter als der Akkumulator.

Der Dauerbetrieb in 1-Punkt-Strategie für das SOFC-System stellt eine extreme Betriebsstrategie dar, welche hohe Anforderungen an andere Komponenten des Antriebsstrangs bzw. passende Lastprofile stellt, was letztendlich die Anzahl geeigneter Anwendungsfälle einschränkt (siehe Abschnitt 4.3). Wo die Umsetzung jedoch möglich ist, bietet diese Betriebsstrategie viele wichtige Vorteile. SOFC-Systeme werden heute überwiegend stationär betrieben, sodass die Implementierung in Fahrzeugen vielfältige Anpassungen erfordert. Herausforderungen wie die Erhöhung der Zyklenfestigkeit können durch den 1-Punkt-Betrieb zugunsten anderer Aspekte, wie die Steigerung der Leis-

tungsdichte, zurückgestellt werden. Mit fortschreitender technischer Entwicklung werden voraussichtlich auch andere Betriebsstrategien an Attraktivität gewinnen.

Tabelle 6: Masse von SOFC-/Tanksystem und Akkumulator bei Bereitstellung der selben Energiemenge bei unterschiedlichen Betriebsdauern (Ergebnisse aus Überschlagsrechnung)

Betriebsdauer [h]	Leistung SOFC-System [kW]	Masse SOFC-System + gefüllter CNG-Tank [kg]	Masse Akkumulator [kg]
2	40,00	2362	556
4	20,00	1251	556
6	13,33	881	556
8	10,00	696	556
10	8,00	584	556
12	6,67	510	556
14	5,71	457	556
16	5,00	418	556
18	4,44	387	556
20	4,00	362	556
22	3,64	342	556
24	3,33	325	556

4.3 Nutzerrelevante Aspekte bei mit 1-Punkt-Strategie betriebenen SOFC-PHEVs

Für den Einsatz von SOFCs in Fahrzeugen und insbesondere für ihren Dauerbetrieb in 1-Punkt-Strategie müssen einige Voraussetzungen erfüllt sein. Daneben gibt es Gesichtspunkte, welche die Einsatzbedingungen insbesondere beim heutigen Stand der Technik verbessern würden. Auf beides wird im Folgenden eingegangen, bevor Anforderungen von Fahrzeugnutzern an das Antriebssystem genannt und schließlich einige mögliche Anwendungsfälle diskutiert werden.

4.3.1 Antriebsseitige Aspekte

Anbindung an ein Stromnetz

Die Anbindung des Fahrzeugs an ein Stromnetz ist wichtig, wenn der vom SOFC-System im Dauerbetrieb produzierte elektrische Strom während längerer Standzeiten des Fahrzeugs verwertet werden soll und es im Fahrzeug selbst keine Möglichkeit dazu

gibt. Es wird auch möglich, Stromspeicher im Fahrzeug aus dem Stromnetz zu laden. Der elektrische Strom kann verkauft oder beispielsweise in einem Unternehmen direkt verbraucht werden. Das Fahrzeug kann immer an derselben Stelle, etwa auf einem Betriebshof, oder an wechselnden Standorten an ein Stromnetz angeschlossen werden. Es muss sichergestellt werden, dass die Abgase des abgestellten Fahrzeugs nicht zu unzumutbaren Immissionen führen.

Verfügbarkeit eines geeigneten Treibstoffes

Gasförmige Treibstoffe reduzieren die Komplexität des SOFC-Systems und seiner Peripherie gegenüber flüssigen Treibstoffen, da sie sich mit geringerem Aufwand entschwefeln lassen und die Reformierung weniger Aufwand erfordert oder nicht erforderlich ist. Der Betrieb von SOFCs mit Gasen ist erprobt, oft werden Methan oder leicht zu verflüssigende Kohlenwasserstoffe verwendet. Als Kraftstoff spielen Gase in Deutschland eine geringe Rolle, im Jahr 2013 betrugen die Anteile von Autogas (LPG, Liquefied Petroleum Gas), Erdgas und Biomethan laut FNR (2015) zusammen weniger als 2 % bezogen auf den Energiegehalt. Im Jahr 2014 gab es in Deutschland 879 Erdgastankstellen (Horizont und Bundesverband Freier Tankstellen 2014) und 6 852 Autogastankstellen (Bundesverband Freier Tankstellen 2014) bei 14 622 Tankstellen insgesamt (MWV 2016).

Für alle Treibstoffe gilt, dass das Tankvolumen bei einem über mehrere Tage stehenden Fahrzeug unter Umständen nicht ausreicht, um dauerhaft die Versorgung der Brennstoffzelle sicher zu stellen. In diesem Fall kann es sinnvoll sein, das Fahrzeug an eine Treibstoffleitung anzuschließen. Dies erfordert den Bau der entsprechenden Infrastruktur und das Implementieren von Sicherheitsmaßnahmen wie einer Wegfahrsperre bei angeschlossener Leitung. Letztere sollte aber auch für den Stromanschluss vorhanden sein. Zu den Vorteilen gehört, dass vor allem bei flüssigen Treibstoffen gegebenenfalls nicht mehr separat getankt werden muss.

Erdgas wird in Deutschland als Kraftstoff höher besteuert als im Fall seiner Nutzung zur Stromerzeugung. Dies könnte dem hier besprochenen Anwendungsfall entgegenstehen, was sich durch eine „Konvergenz der Energiemärkte“ auflösen ließe. Ein pragmatischer Ansatz könnte sein, das stehende Fahrzeug bei geringem Druck mit Gas zu versorgen. Würden die Tanks im Fahrzeug damit gefüllt, wäre die Reichweite des Fahrzeugs gering, es müsste also zusätzlich z. B. an einer CNG-Tankstelle getankt werden. In diesem Fall könnte das dem Fahrzeug auf niedrigem Druckniveau zugeführte Gas möglicherweise mit dem niedrigeren Steuersatz besteuert werden, da seine Nutzung als höher zu steuernder Treibstoff nicht ohne weitere Verdichtung praktikabel wäre.

Betriebsbedingungen, welche eine geringe Nennleistung der SOFC erlauben

Da SOFCs noch vergleichsweise teuer und schwer sind, kann es sinnvoll sein, zunächst möglichst kleine Systeme einzusetzen. Dies kann durch hohe Hybridisierungsgrade nach Gleichung 4.1 oder durch Anforderungsprofile, die einen geringen Energiebedarf beinhal-

ten, gewährleistet werden. So steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass gasförmig gespeicherte Treibstoffe infrage kommen.

Lastprofil

Der Strombedarf des Fahrzeugs muss mit dem Dauerbetrieb des SOFC-Systems vereinbar sein. Lange Standzeiten ohne die Möglichkeit des Anschlusses des Fahrzeugs an einen Stromverbraucher könnten einen unvertretbar groß dimensionierten Stromspeicher im Fahrzeug erfordern. Dies gilt nicht, wenn es im Fahrzeug selbst ausreichend große Stromverbraucher gibt, wie dies vor allem bei Nutzfahrzeugen der Fall sein kann. Lastspitzen lassen sich dagegen neben Stromspeichern auch von zusätzlichen Energiewandlern abdecken.

Spielraum bei Volumen und Masse

Masse und Volumen von SOFC-Systemen sind noch nicht minimiert. Zudem kann es sein, dass ein gasförmiger Treibstoff mitgeführt wird, dessen Tanksystem ebenfalls im Vergleich zu anderen Kraftstoffen mit einer großen Masse und einem großen Volumenbedarf verbunden ist. Daneben wird der Wirkungsgrad des SOFC-Systems zunächst nicht sehr hoch und der Treibstoffbedarf damit noch nicht minimiert sein. Daher sollten Fahrzeuge gefunden werden, die einen gewissen Spielraum bei Volumen und Masse des Antriebssystems aufweisen oder bei denen Vorteile wie geringe Emissionen diese Nachteile überwiegen.

Nutzung von Abwärme und Abgasen des SOFC-Systems

Die Nutzung der Abwärme im Fahrzeug, beispielsweise zum Heizen, ist naheliegend. In einem Patent von Delphi Technologies (Grieve et al. 2005) wird geschildert, dass die Abwärme einer SOFC-APU auch Verbrauchern außerhalb des Fahrzeugs zugeführt werden könnte. An der TU Delft wird vorgeschlagen, Brennstoffzellenfahrzeuge als Kraftwerke zu verwenden und das in der Brennstoffzelle erzeugte Wasser einer Nutzung zuzuführen (van Wijk). Auch Kohlenstoffdioxid könnte aus Fahrzeugen mit SOFC abgeführt werden, um es beispielsweise zur Erzeugung von strombasierten Treibstoffen zu verwenden und den Kohlenstoff so in einem technischen Kreislauf zu führen (Stenger et al. 2012).

Diese Optionen erhöhen die Komplexität des Fahrzeugs und eignen sich daher möglicherweise nicht für erste Anwendungen. Dennoch können zusätzliche Nutzungsoptionen des SOFC-Systems im Fahrzeug Vorteile bieten, die den Ausschlag für seinen Einsatz geben. Sie sollten daher berücksichtigt werden.

4.3.2 Nutzerseitige Aspekte

Die Erfordernisse des Antriebssystems und seiner Betriebsstrategie müssen mit den Anforderungen der Fahrzeugnutzenden an das Antriebssystem vereinbar sein. Nachdem auf das Antriebssystem eingegangen wurde, wird im Folgenden die Nutzerseite betrachtet.

Tabelle 7: Gesichtspunkte für die Bewertung von Antriebssystemen und kurze Einordnung, inwiefern SOFC-HEVs den Anforderungen gerecht werden können (Punkte zusammengestellt auf Basis von Stan (2012) sowie Hoepke und Breuer (2013))

Kriterien zur Bewertung von Fahrzeugen und Antriebssystemen		kurze Einordnung, inwiefern SOFC-HEVs den Anforderungen gerecht werden können
<i>Energie</i>		
1	volumetrische und gravimetrische Leistungsdichte des Energiewandlers für chemische Energie	die Energiedichte von SOFC-Systemen ist im Vergleich zu Verbrennungsmotoren gering, es gibt Verbesserungspotential (siehe Kapitel 3). Vor allem bei hohen Hybridisierungsgraden muss das Gesamtsystem betrachtet werden, da das SOFC-System vergleichsweise klein ausgelegt ist
2	Antriebsleistung	kann je nach Auslegung des Antriebsstranges gewährleistet werden
3	Drehmomentverlauf/ maximales Drehmoment	Drehmomentverlauf von elektrischen Maschinen ist vorteilhaft; maximales Drehmoment ab Drehzahl Null
4	spezifischer Kraftstoffverbrauch	gut, da hohe Wirkungsgrade im Antriebsstrang (SOFC-System, Leistungselektronik, elektrische Maschine) und Bremsenergierückgewinnung möglich
5	Dauer bis zum nächsten Laden	SOFC-System kann als Range Extender dienen, daher je nach Auslegung größer als bei BEVs
6	Motorbremse/ hohe Bremsleistung	elektrische Maschinen können bei minimalem Verschleiß zum Bremsen eingesetzt werden, dabei kann ihre maximale Leistung erreicht werden
7	Kraftstoffverbrauch	vgl. Punkt 4

Kriterien zur Bewertung von Fahrzeugen und Antriebssystemen		kurze Einordnung, inwiefern SOFC-HEVs den Anforderungen gerecht werden können
<i>Kosten</i>		
8	Life Cycle Costs	im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage möglich
9	Fahrzeugpreis	da sowohl SOFC-Systeme als auch Stromspeicher im Vergleich zu Verbrennungsmotoren neu im Antriebsstrang sind, wird der Fahrzeugpreis von SOFC-HEVs höher sein als von ICEVs
10	Wartungs- und Unterhaltskosten	je nach Betriebsstrategie ist die Lebensdauer von SOFC-Systemen hoch. Es gibt wenige bewegliche Teile, die gewartet werden müssten. Modularer Aufbau ermöglicht gezielten Austausch schadhafter Komponenten
11	niedrige Herstellungskosten	vgl. Punkt 9
12	niedrige Betriebskosten	im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage möglich
13	Kraftstoffkosten	vgl. Punkt 4
<i>Umwelt</i>		
14	spezifische Emissionen chemischer Stoffe	voraussichtlich höher als bei reinen Elektrofahrzeugen und geringer als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor
15	Erfüllung derzeitiger und künftiger Abgasgrenzwerte	im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage möglich. Vgl. Punkt 14
16	Geräuschintensität und -frequenz	Geräuschintensität vermutlich geringer als bei Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und höher als bei reinen Elektrofahrzeugen. Möglicherweise hohe Frequenzen, die als besonders störend empfunden werden
17	Recyclingfähigkeit der Komponenten des Antriebsstrangs	im Rahmen dieser Arbeit keine Aussage möglich
18	Recyclingfähigkeit der Betriebsflüssigkeiten	SOFC-Systeme können ohne Betriebsflüssigkeiten auskommen
19	Kraftstoffeffizienz	vgl. Punkt 4

Kriterien zur Bewertung von Fahrzeugen und Antriebssystemen		kurze Einordnung, inwiefern SOFC-HEVs den Anforderungen gerecht werden können
<i>weitere Anforderungen an Fahrzeuge</i>		
20	technische Komplexität	Umstellung auf neues Antriebskonzept ist komplex. Bedeutung und Komplexität des elektrischen Systems im Fahrzeug nehmen zu, Bedeutung des mechanischen Systems nimmt ab
21	Abmessungen/geringer Bedarf an Bauraum des Antriebssystems	vgl. Punkt 1. Die Antriebssysteme von ICEVs und SOFC-HEVs unterscheiden sich stark, sodass ein Vergleich schwierig ist. Ein Vorteil elektrischer Antriebssysteme besteht in der größeren Freiheit bei der Anordnung der Komponenten
22	Masse/Transportleistung/Transportgeschwindigkeit	Masse und Transportleistung: vgl. Punkte 1 und 21. Transportgeschwindigkeit: keine grundsätzliche Beschränkung
23	zügiges Anfahren	Beschleunigung mit Elektromotor ist größer als mit Verbrennungsmotor gleicher Nennleistung
24	Komfort/Elastizität des Antriebs/schaltungsfreier Betrieb	Aussagen im Rahmen dieser Arbeit nur bedingt möglich. Elektromotoren kommen aufgrund ihres großen Drehzahlbereichs oft ohne Schaltgetriebe oder mit zwei Übersetzungsverhältnissen aus
25	Antriebssteuerung	kompatibel mit elektrischem Antriebsstrang
26	Fahrdynamik/Fahrstabilität/gutes dynamisches Verhalten	elektrischer Antriebsstrang schafft gute Voraussetzungen dafür
27	Freiheitsgrade der Bewegung	elektrischer Antriebsstrang schafft gute Voraussetzungen dafür
28	Reichweite	Voraussetzung für große Reichweite durch Verwendung chemischer Energieträger gegeben. Kann vor allem kurzfristig durch Verwendung gasförmiger Treibstoffe und noch schwere SOFC-Systeme und Stromspeicher eingeschränkt werden
29	Elektrische Verbraucher	Energieverbraucher elektrisch zu betreiben, kann Vorteile bieten. SOFC stellt elektrische Energie bereit, Lichtmaschine entfällt
30	Schnellstartfähigkeit	vgl. Abschnitt 3.1.2. Langen Startzeiten kann mit verschiedenen Strategien begegnet werden (vgl. Abschnitt 4.2)

Kriterien zur Bewertung von Fahrzeugen und Antriebssystemen		kurze Einordnung, inwiefern SOFC-HEVs den Anforderungen gerecht werden können
31	hohe Lebensdauer/ Zuverlässigkeit/ lange Wartungsintervalle	vgl. Punkte 10, 18
32	Sicherheit	in Abschnitt 3.2 aufgeführte Beispiele für mobile SOFC-Systeme und (Überlegungen zu) ihrem Einsatz in Fahrzeugen deuten darauf hin, dass eine ausreichende Sicherheit gewährleistet werden kann
33	Bauteilreduzierung	SOFC-Stacks bestehen aus vielen Komponenten. Ein detaillierter Vergleich der Bauteile der Antriebsstränge von ICEVs und SOFC-HEVs ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich
34	hohe Flexibilität für unterschiedliche Märkte und Einsatzbedingungen	die Auslegung des Antriebsstranges ist stark von den Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalles abhängig. Der modulare Aufbau von SOFC-Systemen und von Stromspeichern wie Akkumulatoren lassen dies als gut umsetzbar erscheinen
<i>Infrastruktur/Systemisches</i>		
35	Verfügbarkeit und Speicherkapazität der vorgesehenen Energieträger	SOFC-Systeme weisen eine hohe Treibstoffflexibilität auf, sodass allgemeine Aussagen zu den Eigenschaften der Energieträger nicht möglich sind
36	erforderliche Infrastruktur	Infrastruktur für besonders gut geeignete gasförmige Energieträger ist vorhanden, aber ausbaufähig. Für beispielsweise Methan besteht für andere Zwecke eine gut ausgebaute Infrastruktur. Der Energieträger kann auf mehrere Arten regenerativ gewonnen werden, sodass der Ausbau von CNG- oder auch LNG- Infrastruktur durch ihre langfristige Nutzung gerechtfertigt sein könnte
37	Service-möglichkeiten	aufgrund der neuen Technik zunächst sehr begrenzt
38	Dauer des Betankens	je nach Energieträger und Infrastruktur (vgl. Abschnitt 4.2)

In Tabelle 7 sind Anforderungen aufgelistet, welche an Fahrzeuge und ihre Antriebssysteme gestellt werden können. Zudem wird eine kurze Einordnung vorgenommen, inwiefern SOFC-HEVs diesen gerecht werden könnten. Auf eine Reihe von Punkten wirken sich vor allem die Eigenschaften des elektrischen Antriebsstrangs und der hohe Wirkungsgrad sowie die geringen Emissionen des SOFC-Systems positiv aus. Andere sind

neben den technischen Eigenschaften stark von weiteren Einflussfaktoren, wie etwa politischen Rahmenbedingungen, abhängig. So ist noch nicht absehbar, wie sich Emissionsgrenzwerte ändern werden. Auch werden Kosten politisch beeinflusst, was sich unter anderem auf die Verfügbarkeit von Treibstoffen auswirken kann. Für diese sind mittelfristig deutliche Änderungen zu erwarten.

Vor allem bei einigen Eigenschaften von SOFC-Systemen ist die zeitliche Dimension zu berücksichtigen. Die neue Technik wird zunächst mit hohen Produktionskosten verbunden sein, welche mit fortschreitender Entwicklung sinken werden. Andere Kosten, wie für Treibstoff und Wartung, versprechen, vergleichsweise gering zu sein. Auch hier wird es durch technischen Fortschritt zu Verbesserungen kommen. Während auch bei der gravimetrischen und volumetrischen Leistungsdichte von SOFC-Systemen für die Zukunft gute Werte zu erwarten sind (vgl. Abschnitt 3.1.3), könnten sich diese für erste Anwendungsfälle als besonders kritisch erweisen (siehe Tabelle 6). Dies gilt auch für die Anfahrzeit von SOFC-Systemen. Besonders diesem Punkt lässt sich mit geeigneten Betriebsstrategien begegnen (siehe Abschnitt 4.2). Weitere Herausforderungen sind mit der Sicherheit und Komplexität des Antriebssystems verbunden.

4.3.3 Eingrenzung möglicher Anwendungsfälle

Nachdem in Abschnitt 4.3.1 darauf eingegangen wurde, welche Randbedingungen für den Einsatz und 1-Punkt-Dauerbetrieb von SOFCs in Antriebssystemen erforderlich und förderlich sind und in Abschnitt 4.3.2 darauf, welche Anforderungen von Fahrzeugnutzenden an Fahrzeugantriebe gestellt werden, sollen nun mögliche Anwendungsfälle ermittelt werden. Dafür werden zunächst Gesichtspunkte angeführt, die den Einsatz von SOFCs in Fahrzeugantrieben begünstigen. Die eingeklammerten kurzen Begründungen beziehen sich meist auf in Abschnitt 4.3.1 genannte Punkte.

- Fahrzeuge aus Fahrzeugflotten
 - oft können bei jedem langen Halt dieselben Stellplätze genutzt werden (Anbindung an ein Stromnetz, Verfügbarkeit eines geeigneten Treibstoffes)
 - Auswahl an Fahrzeugen ermöglicht, dass geeignete Touren für das Fahrzeug ausgewählt werden können (passendes Lastprofil)
- Nutzfahrzeuge
 - tendenziell längere Einsatzzeiten pro Tag als bei Privatfahrzeugen, Lastprofil oft regelmäßig (passendes Lastprofil)
 - ggf. kann der eingespeiste Strom zu großen Teilen als Eigenverbrauch im Unternehmen genutzt werden
- Fahrzeuge, die mittelfristig als BEV infrage kommen, aber noch etwas zu schwer wären (kleine SOFC-Systeme)
- große schwere Fahrzeuge (Spielraum bei Volumen und Masse, primär beim Volumen. Ist die Masse kritisch, kann das Fahrzeug ggf. als SOFC-ICE-HEV ausgeführt werden, SOFC-System hat dann kleinen Anteil an Gesamtmasse)

- Fahrzeuge mit hohem elektrischem Energiebedarf oder hohem Energiebedarf bei stehendem Fahrzeug (passendes Lastprofil)
- Fahrten ausschließlich oder überwiegend in Stadtgebieten (kleine SOFC-Systeme)

Anhand dieser Punkte lässt sich abschätzen, welche Fahrzeugtypen besonders für geeignete Anwendungsfälle infrage kommen könnten. Dazu könnten unter anderem die folgenden zählen: Abfallsammelfahrzeuge, Absetzkipper, Flugzeugschlepper, Flurfördergeräte, Kehrmaschinen, Omnibusse, Saug- und Druckwagen, Verteiler-Lkws, Zustellfahrzeuge.

Technische Fortentwicklung von Antriebssystemen mit SOFCs kann die Anzahl geeigneter Anwendungsfälle vergrößern. Je mehr etwa der Wirkungsgrad des Gesamtsystems steigt, desto größer wird vor allem bei Fahrzeugen mit großem Energiebedarf das Einsparpotential von Treibstoff. Die Möglichkeit weiterer Anwendungsfälle besteht auch bei Veränderungen im Mobilitätsverhalten, wenn also beispielsweise vermehrt Busse oder Bahnen auf nicht elektrifizierten Strecken genutzt würden. Gewinnt Carsharing weiter an Bedeutung, gehören auch Pkws zunehmend Fahrzeugflotten an und eignen sich dadurch besser für den Einsatz von SOFCs. Auch autonomes Fahren könnte den Einsatz von SOFCs befördern, da Pausenzeiten minimiert und damit das Lastprofil verstetigt werden könnte.

Brennstoffzellenfahrzeuge stehen in Konkurrenz zu Fahrzeugen mit anderen Antriebskonzepten. Vor allem reine Elektrofahrzeuge sind aufgrund hoher Wirkungsgrade und Abgasfreiheit attraktiv. Verbessern sich für sie die Randbedingung, etwa durch Fortschritte bei den Stromspeichern oder durch den Aufbau von Infrastruktur (z. B. Oberleitungen, Lade- oder Wechselmöglichkeiten für Akkumulatoren), kann sich dies negativ auf die Anzahl von SOFC-HEVs auswirken.

5 Auswirkungen auf den Stromsektor

Für den Energiesektor ist die Energiewende mit tiefgreifenden Änderungen verbunden. Für den Stromsektor in Deutschland ist zu erwarten, dass die Stromerzeugung zunehmend von fluktuierend einspeisenden Photovoltaik- und Windenergieanlagen dominiert wird. Kernkraftwerke mit einer Nettoleistung von insgesamt 10,8 GW (Bundesnetzagentur 2015) werden vom Netz genommen, die Stromerzeugung aus fossilen Brennstoffen geht stark zurück. Dem Betrieb von Kohlekraftwerken steht entgegen, dass sie einen vergleichsweise hohen CO₂-Emissionsfaktor aufweisen und eine flexible Betriebsweise nur begrenzt möglich ist. Gaskraftwerke werden zunehmend mit regenerativ erzeugten Brennstoffen betrieben. Die Konsequenzen aus dem im Übereinkommen von Paris vereinbarten 1,5-Grad-Ziel sind noch unklar. Laut Höhne et al. (2016) sollte bis etwa 2025 in Deutschland die Stromerzeugung aus Kohle beendet werden und um das Jahr 2030 die Stromerzeugung vollständig dekarbonisiert sein, wenn das Ziel möglichst ohne negative Emissionen erreicht werden soll. Im Mai 2016 betrug die elektrische Nettoleistung von Braunkohlekraftwerken in Deutschland insgesamt 21,1 GW und diejenige von Steinkohlekraftwerken 28,3 GW (Bundesnetzagentur 2015).

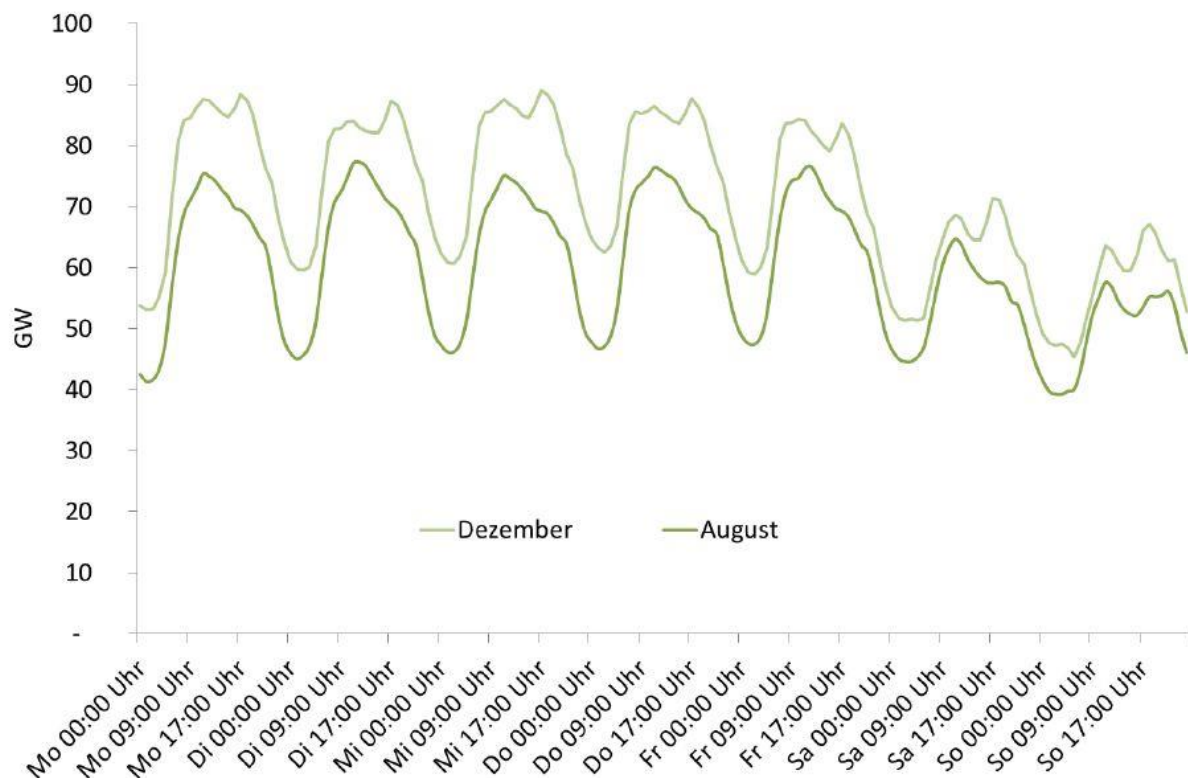


Abbildung 5.1: Typische Zyklen der Last in Deutschland - Winterwoche und Sommerwoche (Quelle: Peek und Diels 2016)

Trotz Effizienzsteigerungen ist eine Steigerung des Stromverbrauchs absehbar, da der Strombedarf des Wärme- sowie Verkehrssektors ansteigt. Durch Laststeuerung werden Teile des Stromverbrauchs an die Stromerzeugung angeglichen. Beispielsweise können Akkumulatoren in BEVs vorzugsweise bei großem Stromangebot geladen werden. Darüber hinaus können sie, auch nach ihrer Nutzung im Fahrzeug, als Kurzzeitspeicher

genutzt werden. Es kann von einer starken Zunahme der Gesamtkapazität von Kurzzeitspeichern ausgegangen werden. Dies kann aufgrund des hohen Wirkungsgrads von Kurzzeitspeichern insbesondere im Sommer, bei regelmäßiger großer Strom einspeisung aus Photovoltaikanlagen, auch nachts zu einem sehr geringen Bedarf an Strom aus thermischen Kraftwerken führen, deren Anzahl an Volllaststunden sinkt.

In anderen Jahreszeiten muss jedoch damit gerechnet werden, dass die Erzeugung aus Photovoltaik- und Windenergieanlagen den Bedarf über Wochen in weiten Teilen Europas nicht decken kann („dunkle Flaute“). Die Stromversorgung aus erneuerbaren Energien über weitere Entfernungen sowie aus Kurzzeitspeichern kann in diesem Fall unmöglich sein. Die Technik „Power-to-Gas“ gilt als vielversprechender Ansatz, in einem weitgehend auf erneuerbaren Energien beruhenden Stromsystem eine Langzeitspeicherung von elektrischem Strom zu gewährleisten. Um die mit dieser Technik erzeugten chemischen Energieträger wieder zur Stromerzeugung nutzen zu können, sind entsprechende Kapazitäten geeigneter Energiewandler erforderlich.

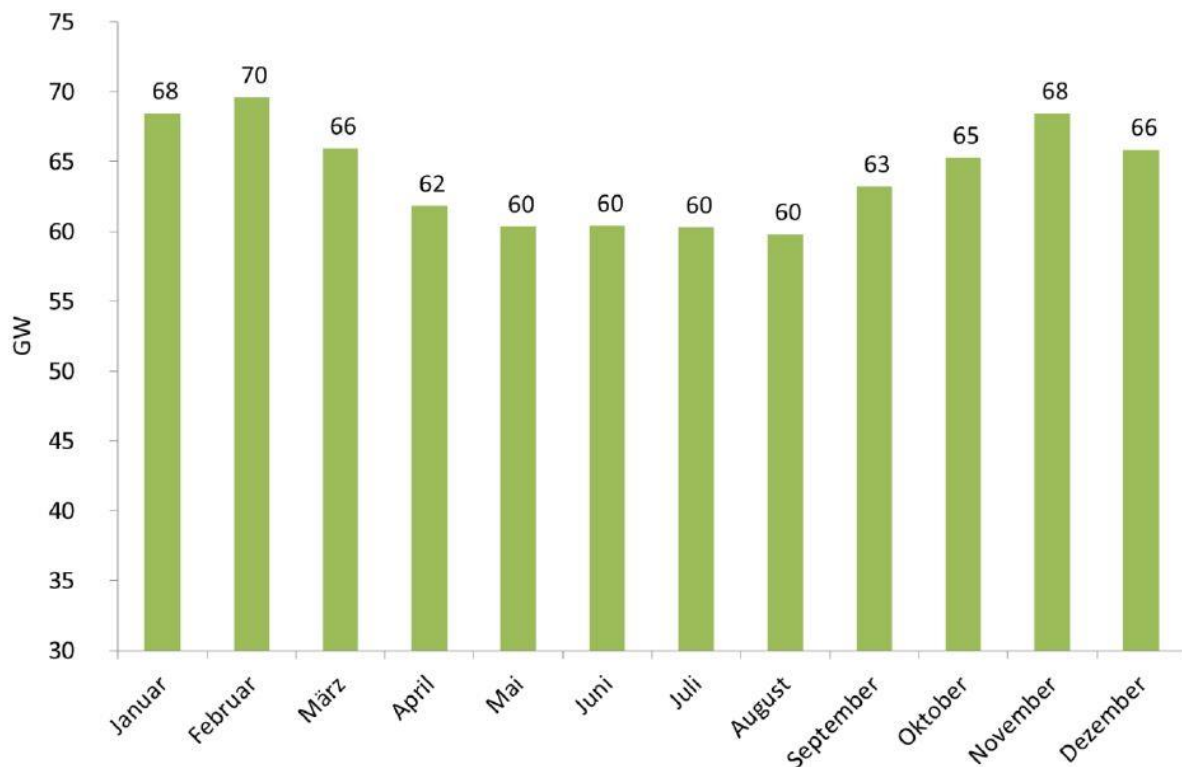


Abbildung 5.2: Durchschnittliche monatliche Last in Deutschland – Mittel über die Jahre 2007 bis 2012 (Quelle: Peek und Diels 2016)

Geeignete heute bestehende Kapazitäten betreffen in erster Linie mit Erdgas betriebene Kraftwerke. Im Mai 2016 betrug ihre elektrische Nettoleistung insgesamt 28,5 GW (Bundesnetzagentur 2015). Aus Abbildung 5.2 geht hervor, dass bereits heute mit einem durchschnittlichen monatlichen Leistungsbedarf von 60 GW bis 70 GW gerechnet werden muss. Der durchschnittliche Leistungsbedarf einzelner Tage und Stunden kann diesen Wert übertreffen (vgl. Abbildung 5.1). Soll die Versorgungssicherheit zukünftig über Power-to-Gas gewährleistet werden, müssen die Kapazitäten an geeigneten

Stromerzeugern stark erhöht werden, auch wenn mit einer geringen Auslastung der Anlagen gerechnet werden muss.

Mit strombasierten Treibstoffen betriebene SOFC-HEVs tragen im Gegensatz zu direkt mit Strom betriebenen Fahrzeugen nicht zur Erhöhung der zum Sicherstellen der Versorgungssicherheit während „Dunkelflauten“ erforderlichen Kraftwerkskapazitäten bei, da es eine größere zeitliche Entkopplung von Umwandlung der Primärenergie und der Nutzung der Endenergie gibt.

SOFC-PHEVs können zur Sicherstellung der Versorgungssicherheit beitragen, wenn Strom aus den stehenden Fahrzeugen ins Verbundnetz eingespeist wird. Ähnlich wie bei Photovoltaik- und Windenergieanlagen kann keine durchgängige Stromeinspeisung gewährleistet werden, für die Gesamtheit der SOFC-PHEVs ist jedoch eine gewisse Regelmäßigkeit bei der Einspeisung bei einem nur geringen Einfluss des Wetters zu erwarten. Findet die größte Einspeisung etwa nachts statt, kann durch Kurzzeitspeicher ein Teil dieser Energie am Tag nutzbar gemacht werden. Beispiele für den Einsatz weiterer Flexibilitätsoptionen sind das nächtliche Betreiben von Wärmepumpen und das Laden der Akkumulatoren von BEVs während dieser Zeit.

Für die Abschätzung der möglichen Gesamtleistung aller Brennstoffzellen in SOFC-PHEVs muss eine Reihe von Annahmen getroffen werden. Exemplarisch wird hier eine Abschätzung für die Fahrzeugklasse „Sattelzugmaschine“ vorgenommen. Es wird angenommen, dass eine Sattelzugmaschine in der Lage sein muss, einen Auflieger über weite Strecken mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h zu bewegen, wobei die Gesamtmasse des Sattelzuges 40 t betragen kann. Von Hoepke und Breuer (2013) wird für die Summe aus Roll- und Luftwiderstand eines Sattelzuges mit 40 t Masse für eine Geschwindigkeit von 85 km/h der Wert 98 kW angegeben. Es wird davon ausgegangen, dass der Stromspeicher des Hybridfahrzeuges für Lastspitzen und zur Rekuperation eingesetzt wird. Aufgrund des hohen Leistungsbedarfs wird auf Autobahnfahrten jedoch die gesamte benötigte Energie vom Brennstoffzellensystem bereitgestellt. Für dieses wird eine Leistung von 100 kW angenommen. Dies setzt voraus, dass eine ausreichend hohe Leistungsdichte des Brennstoffzellensystems erreicht wird.

Am 01.01.2016 umfasste der Bestand an Sattelzugmaschinen in Deutschland 194 386 Fahrzeuge (Kraftfahrt-Bundesamt 2016). Im Jahr 2014 wurden in Deutschland 34 330 Sattelzugmaschinen neu zugelassen (Kraftfahrt-Bundesamt 2015). Bei einer Leistung von 100 kW je Sattelzugmaschine entspräche dies Gesamtleistungen von 19,4 GW bzw. 3,4 GW. Die tatsächlich ans Verbundnetz angeschlossene Gesamtleistung wäre stark zeitabhängig und oft viel geringer als das theoretische Maximum.

Für strombasierten Verkehr werden ausreichende Kapazitäten zur primären Stromerzeugung benötigt. Da jede Energiewandlung verlustbehaftet ist, ist zu erwarten, dass der Well-to-Wheel-Wirkungsgrad umso größer ist, je direkter der primär erzeugte Strom im Fahrzeug genutzt werden kann. Mit Stromtreibstoffen angetriebene Fahrzeuge erfordern demnach größere primäre Erzeugungskapazitäten als BEVs und diese wiederum größere als leitungsgebundene Fahrzeuge. Einschränkend sei angemerkt, dass mit Power-to-Gas-Anlagen gegebenenfalls Stromüberschüsse nutzbar gemacht werden können, wel-

che andernfalls abgeregelt würden. Angesichts weiterer Nutzungsoptionen für Stromüberschüsse und möglichst hoher Volllaststunden für Power-to-Gas-Anlagen ist jedoch davon auszugehen, dass der Einsatz dieser Technik deutlich zum Bedarf an primären Stromerzeugungskapazitäten beiträgt.

Wird bei positiver Residuallast Strom aus Speichern ins Verbundnetz eingespeist, gelten die genannten Zusammenhänge beim Well-to-Wheel-Wirkungsgrad nicht mehr uneingeschränkt: wird ein leitungsgebundenes Fahrzeug mit Strom aus Kurzzeitspeichern angetrieben, treten ähnliche Verluste auf wie bei BEVs. Wird es mit Strom aus Langzeitspeichern angetrieben, kann die Wandlungskette sehr derjenigen von mit Stromtreibstoffen angetriebenen Fahrzeugen ähneln. Beim BEV würden in diesem Fall zusätzliche Verluste des Kurzzeitspeichers auftreten. In allen Fällen wären die Transportverluste von elektrischer Energie sowie der chemischen Energieträger zu berücksichtigen.

Das Stromnetz kann möglicherweise entlastet werden, wenn statt Strom Treibstoffe transportiert werden.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Zentrum dieser Arbeit stand die Frage, inwiefern SOFCs als Antriebsaggregate in Fahrzeugen genutzt werden könnten. Aus den auf Recherche basierenden Abschnitten 3.1 und 3.2 geht hervor, dass SOFCs für den Einsatz in Fahrzeugen geeignete technische Eigenschaften aufweisen können oder diese für die Zukunft erwarten lassen. Bestätigt wird dies durch die vorgestellte Bandbreite an bereits vorhandenen Konzepten und ersten Schritten zur Nutzung von SOFCs in Fahrzeugen.

Mögliche Vorteile von SOFCs gegenüber Verbrennungsmotoren betreffen den Wirkungsgrad sowie Lärm- und Schadstoffemissionen. Gegenüber PEMFCs ist der Vorteil einer größeren Treibstoffflexibilität hervorzuheben. Gegenüber Akkumulatoren ist eine geringere Masse zu erwarten. Den meist mit den hohen Betriebstemperaturen verbundenen Nachteilen, etwa beim dynamischen Verhalten, kann oft durch Kombinieren des SOFC-Systems mit einem geeigneten Stromspeicher begegnet werden (siehe Abschnitt 3.3).

Allgemein kann bei SOFCs von einem Verbesserungspotential ausgegangen werden. SOFC-Systeme werden bisher überwiegend stationär betrieben und sind meist nicht für den Einsatz in Fahrzeugen konzipiert. Die mechanische Stabilität muss an die Anforderungen im Fahrzeug angepasst werden. Eine gravimetrische Leistungsdichte, die Massenvorteile gegenüber Akkumulatoren ermöglicht, ist nicht selbstverständlich. Da es weitere Gesichtspunkte gibt, kann der Anpassungsbedarf für den Einsatz von SOFCs in Fahrzeugen sehr groß werden.

In Abschnitt 4.2 wird daher vorgeschlagen, für erste Anwendungen sowohl das Antriebssystem als auch die Betriebsstrategie des SOFC-Systems an dessen Eigenschaften anzupassen. Der Stromspeicher und ggf. Verbrennungsmotor (vgl. Abschnitt 4.1) werden entsprechend ausgelegt. Als Betriebsstrategie wird 1-Punkt-Dauerbetrieb vorgeschlagen, welcher dadurch ermöglicht wird, dass das stehende Fahrzeug elektrische Energie in ein Stromnetz einspeisen kann. Dieser Vorschlag kann insofern als eine konsequente Umsetzung des Ansatzes von Hybridfahrzeugen betrachtet werden, als die Bereitstellung der Antriebsleistung im reinen SOFC-PHEV völlig unabhängig von der Wandlung chemischer Energie stattfindet. Für beide Funktionen wird mit der elektrischen Maschine und der Brennstoffzelle auf jeweils sehr gut geeignete Aggregate zurückgegriffen. In Abschnitt 4.3 wird erörtert, was dies für mögliche Nutzer bedeuten würde und möglicherweise geeignete Fahrzeugtypen werden herausgearbeitet.

SOFC-Systeme können die Wirkungsgrade der effizientesten heutigen thermischen Kraftwerke erreichen und übertreffen. In Kapitel 5 wird dargelegt, dass SOFC-PHEVs durch die daher infrage kommende Stromeinspeisung ins Verbundnetz zur Versorgungssicherheit im Stromsektor beitragen könnten, indem sie als Ausspeichereinheiten für Langzeitspeicher dienen. Würde diese für die Energiewende wichtige Fähigkeit monetär vergütet, könnte dies zur schnellen Einführung der neuen und daher zunächst vergleichsweise teuren Antriebssysteme beitragen. Aus den Ausführungen in Kapitel 5 geht aber auch hervor, dass mit den dafür in Deutschland momentan vorgesehenen Knapp-

heitspreisen aufgrund voraussichtlich selten auftretender Stromknappheiten nicht oft zu rechnen ist. Kurz- und mittelfristig könnten Knappheiten durch das Abstecken eines Pfades für den Kohleausstieg erzeugt werden. Ausgehend von der Annahme, dass die tiefgreifenden Änderungen im komplexen Energiesystem dynamische Instrumente erfordern, machen Moog und Bockelmann (2015) einen Vorschlag mit entgegengesetztem Ansatz: je öfter und ausgeprägter niedrige Börsenstrompreise auftreten, was beim fortschreitenden Zubau fluktuierend einspeisender erneuerbare-Energie-Anlagen und vor allem in Kombination mit unflexiblen konventionellen Kraftwerken zu erwarten ist, desto mehr Mittel werden für die Erhöhung der Versorgungssicherheit aus erneuerbaren Energien bereitgestellt. Bei niedrigen Börsenstrompreisen wird eine Abgabe erhoben, um u. a. den Betrieb von Langzeitspeichern zu unterstützen. Deren Zubau ermöglicht das Abschalten von unflexiblen Kraftwerken, Gründen für niedrige Börsenstrompreise wird entgegengewirkt. Diese negative Rückkopplung soll trotz schnellen Ausbaus fluktuierender Erzeuger und bei vielfältigen Unwägbarkeiten, etwa bei technischen Fortschritten und Preisentwicklungen, jederzeit die Versorgungssicherheit gewährleisten.

Das mögliche Potential von SOFCs als Antriebsaggregat hängt von vielen Faktoren ab. Die bevorstehenden Veränderungen im Energiesystem sind tiefgreifend und noch nicht im Einzelnen abzusehen. Ist der Well-to-Wheel-Wirkungsgrad für die Auswahl der Antriebssysteme entscheidend, werden chemische Energiespeicher im Verkehrssektor nur eine kleine Rolle spielen. Wichtigen Einfluss werden daneben politische Entscheidungen etwa zur Infrastruktur und zu systemischen Lösungsansätzen zu Verkehrsproblemen haben. Die Umweltwirkungen auch der Herstellung von SOFC-Fahrzeugen sind noch nicht untersucht. Die tatsächlichen Potentiale von SOFCs in Fahrzeugen sind noch unbekannt. Von Forschung und Entwicklung zu SOFCs im Rahmen ihrer Verwendung in Fahrzeugen könnten andere Anwendungsbereiche sowie ähnliche Techniken wie SOECs (solid oxide electrolyser cells) oder allgemein katalytische Membranreaktoren profitieren.

In einer Reihe von Anwendungsfällen erscheint die langfristige Nutzung von Treibstoffen als wahrscheinlich. Dazu gehören örtlich besonders vorteilhafte Erzeugungsbedingungen, hoher Energiebedarf etwa bei großen Schiffen oder bei Zügen auf Strecken ohne Oberleitung. Fahrzeuge, die in abgelegenen Gebieten eingesetzt werden, können ebenso dazu gehören wie Fahrzeuge, deren Einsatzfähigkeit auch während Blackouts sehr wichtig ist. Chemische Energieträger haben sich im Verkehrssektor bewährt, ihre Verwendung ist eingeübt. Solange auf fossilen Energieträgern basierende Treibstoffe verwendet werden, kann ihr Bedarf durch den hohen Wirkungsgrad von SOFCs reduziert werden. Der Einsatz von SOFC-Fahrzeugen ist ohne große Infrastrukturmaßnahmen möglich. Insgesamt erscheint die Entwicklung von SOFC-Fahrzeugen als chancenreich, das Risiko völlig fehlinvestierter Ressourcen als gering.

Die nächsten Schritte könnten darin bestehen, möglicherweise geeignete erste Anwendungsfälle zu untersuchen und gegebenenfalls unter Entwicklung geeigneter SOFC-Systeme umzusetzen. Mit fortschreitender Entwicklung der Technik oder durch Fortschritte bei konkurrierenden Konzepten können sich weitere bzw. andere Anwendungsfälle ergeben.

Literaturverzeichnis

Adelan (Hg.): SAFARI project. Online verfügbar unter <http://www.adelan.co.uk/projects-2/examples-of-live-projects/safari/>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

Adelan (Hg.): Sapiens project. Online verfügbar unter <http://www.adelan.co.uk/projects-2/examples-of-live-projects/sapiens/>, zuletzt geprüft am 08.05.2016.

AGUIAR, P., BRETT, D., BRANDON, N. P. (2007): Feasibility study and techno-economic analysis of an SOFC/battery hybrid system for vehicle applications. In: *Journal of Power Sources* 171 (1), S. 186–197. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.12.049.

BAEHR, H. D.; KABELAC, S. (2012): Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen. 15. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (Springer-Lehrbuch).

BANIASADI, E., DINCER, I. (2011): Energy and exergy analyses of a combined ammonia-fed solid oxide fuel cell system for vehicular applications. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 36 (17), S. 11128–11136. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2011.04.234.

BEHLING, N. H. (2013): Fuel cells. Current technology challenges and future research needs. [Amsterdam]: Elsevier.

BI, L., BOULFRAD, S., TRAVERSA, E. (2015): Reversible solid oxide fuel cells (R-SOFCs) with chemically stable proton-conducting oxides. In: *Solid State Ionics* 275, S. 101–105. DOI: 10.1016/j.ssi.2015.03.006.

BLOOM ENERGY (2015): ES-5710 Fuel Cell Data Sheet. Online verfügbar unter <http://www.bloomenergy.com/fuel-cell/es-5710-data-sheet/>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

BRETT, D., AGUIAR, P., BRANDON, N. P. (2006a): System modelling and integration of an intermediate temperature solid oxide fuel cell and ZEBRA battery for automotive applications. In: *Journal of Power Sources* 163 (1), S. 514–522. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.08.036.

BRETT, D., AGUIAR, P., BRANDON, N. P., BULL, R. N., GALLOWAY, R. C., HAYES, G. W. ET AL. (2006b): Concept and system design for a ZEBRA battery–intermediate temperature solid oxide fuel cell hybrid vehicle. In: *Journal of Power Sources* 157 (2), S. 782–798. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.12.054.

BUNDESNETZAGENTUR (2015): Kraftwerksliste - Stand: 10.05.2016. Online verfügbar unter http://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerksliste/kraftwerksliste-node.html, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

BUNDESVERBAND FREIER TANKSTELLEN (2014): Anzahl der Autogas-Tankstellen in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2014. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/154361/umfrage/anzahl-der-autogas-tankstellen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

CABLE, T. L., SETLOCK, J. A., FARMER, S. C., ECKEL, A. J. (2011): Regenerative Performance of the NASA Symmetrical Solid Oxide Fuel Cell Design. In: *International Journal of Applied Ceramic Technology* 8 (1), S. 1–12. DOI: 10.1111/j.1744-7402.2009.02477.x.

DELPHI AUTOMOTIVE SYSTEMS, LLC (2015): Final Report. Recovery Act: Solid Oxide Fuel Cell Diesel Auxiliary Power Unit Demonstration. Unter Mitarbeit von Rodica Sibisan, Gail Geiger, Dimitrios Papageorgopoulos und David Peterson, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

EUROPEAN COMMISSION (2010): Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials.

FNR (2015): Verteilung des Kraftstoffverbrauchs in Deutschland nach Kraftstoffarten im Jahr 2013. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/198556/umfrage/verbrauchsanteil-von-primaerkraftstoff-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

FORSCHUNGSZENTRUM JÜLICH (2015): Weltrekord: Jülicher Brennstoffzelle läuft seit über 70.000 Stunden. FZJ. Online verfügbar unter <http://www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2015/15-10-22brennstoffzellenrekord.html?nn=448936>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

FUEL CELLS BULLETIN (2013): FCO Power develops high power density, low-cost SOFC stack. In: *Fuel Cells Bulletin* 2013 (11), S. 10. DOI: 10.1016/S1464-2859(13)70387-0.

FÜRSTENWERTH, D., WALDMANN, L., ET AL. (2014): Stromspeicher in der Energiewende. Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilnetz. Hg. v. Agora Energiewende (050/10-S-2014/DE). Online verfügbar unter http://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

GIANNOPOULOS, D., FOUNTI, M. (2010): Life Cycle Assessment of a SOFC micro CHP unit. In: EFCF 2010: Proceeding of the European Solid Oxide Fuel Cell Forum. Luzern, Schweiz.

GRIEVE, M. J., MACBAIN, J. A., BOTTI, J. J. (2005): ELECTRIC VEHICLE HAVING MULTIPLE-USE APU SYSTEM am 04.04.2005. Anmeldenr: 60/668,166. Veröffentlichungsnr: US 20060219448 A1.

GRINBERG DANA, A., SHTER, G. E., GRADER, G. S. (2015): Nitrogen-Based Alternative Fuels. Progress and Future Prospects. In: *Energy Technology*, S. n/a-n/a. DOI: 10.1002/ente.201500232.

HAGERSKANS, J., GREISEN, C., RECHBERGER, J., KAUPERT, A., BRANDT, S., BOSTELMANN, S. ET AL. (2015): PROJECT FINAL REPORT. Demonstration of 1st European SOFC Truck APU. Unter Mitarbeit von Jürgen Rechberger. Hg. v. AVL List GmbH. Online verfügbar unter http://www.desta-project.eu/fileadmin/downloads/Deliverables/278899_DESTA_Final_Publishable_Summary_Report.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

HITTEC. High Temperature Thermoelectric Converter for Electricity Generation in a SOFC System. In: Competence Center Energy and Mobility CCEM (Hg.): CCEM – Project Report 2014. Unter Mitarbeit von Fritz Gassmann und Urs Elber, S. 27–29.

HOEPKE, E., BREUER, S. (Hg.) (2013): Nutzfahrzeugtechnik. Grundlagen, Systeme, Komponenten. 7., überarb. u. erw. Aufl. 2013. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (ATZ/MTZ-Fachbuch).

HOFMANN, P. (2014): Hybridfahrzeuge. Ein alternatives antriebssystem für die zukunft. 2. Auflage. Vienna, Austria: Springer.

- HÖHNE, N., KURAMOCHI, T., STERL, S., RÖSCHEL, L. (2016): Was bedeutet das Pariser Abkommen für den Klimaschutz in Deutschland? Kurzstudie von NewClimate Institute im Auftrag von Greenpeace. Hg. v. Greenpeace e.V. NewClimate - Institute for Climate Policy and Global Sustainability gGmbH. Online verfügbar unter http://www.greenpeace.de/files/publications/160222_klimaschutz_paris_studie_02_2016_fin_neu.pdf, zuletzt geprüft am 16.05.2016.
- HOOGERS, G. (Hg.) (2003): Fuel cell technology handbook. Boca Raton, Fla.: CRC Press
- HORIZONT, BUNDESVERBAND FREIER TANKSTELLEN (2014): Bestand an Erdgastankstellen in Deutschland von 2001 bis 2014. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/256646/umfrage/anzahl-der-erdgastankstellen-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.
- INFORMATIONSDIENST, B. (2013): Emissionsarme Energieversorgung auf dem Rastplatz. In: *Projektinfos - Energieforschung konkret* (02/2013).
- KAMPKER, A.; VALLÉE, D.; SCHNETTLER, A. (2013): Elektromobilität. Grundlagen einer Zukunftstechnologie. Berlin, Heidelberg: Springer, zuletzt geprüft am 10.12.2015.
- KENDALL, M., MEADOWCROFT, A. D., KENDALL, K. (2013): Microtubular Solid Oxide Fuel Cells (mSOFCs). In: *ECS Transactions* 57 (1), S. 123–131. DOI: 10.1149/05701.0123ecst.
- KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2015): Fahrzeugzulassungen (FZ). Neuzulassungen von Nutzfahrzeugen, Kraftfahrzeugen insgesamt und Kraftfahrzeuganhängern nach technischen Daten (Größenklassen, Motorisierung, Fahrzeugklassen und Aufbauarten) Jahr 2014. FZ 26. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg. Online verfügbar unter http://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Neuzulassungen/Motorisierung/motorisierung_node.html, zuletzt geprüft am 01.05.2016.
- KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (2016): Fahrzeugzulassungen (FZ). Bestand an Kraftfahrzeugen und Kraftfahrzeuganhängern nach Zulassungsbezirken. FZ 1. Hg. v. Kraftfahrt-Bundesamt. Flensburg. Online verfügbar unter http://www.kba.de/SharedDocs/Publikationen/DE/Statistik/Fahrzeuge/FZ/2016/fz1_2016.pdf?__blob=publicationFile&v=5, zuletzt geprüft am 01.05.2016.
- KREWITT, W. (2004): Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung. Ökobilanzen, Szenarien, Marktpotenziale. Berlin: Schmidt (Beiträge zur Umweltgestaltung A, 156).
- LUTZ, A. E., LARSON, R. S., KELLER, J. O. (2002): Thermodynamic comparison of fuel cells to the Carnot cycle. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 27 (10), S. 1103–1111. DOI: 10.1016/S0360-3199(02)00016-2.
- MARTINEZ, A. S., BROUWER, J., SAMUELSEN, G. S. (2012a): Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power part II. System packaging and operating route simulation. In: *Journal of Power Sources* 213, S. 358–374. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.04.023.
- MARTINEZ, A. S., BROUWER, J., SAMUELSEN, G. S. (2012b): Feasibility study for SOFC-GT hybrid locomotive power: Part I. Development of a dynamic 3.5MW SOFC-GT FORTRAN model. In: *Journal of Power Sources* 213, S. 203–217. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2012.04.024.
- MARTINEZ, A. S., BROUWER, J., SAMUELSEN, G. S. (2015): Comparative analysis of SOFC–GT freight locomotive fueled by natural gas and diesel with onboard reformation. In: *Applied Energy* 148, S. 421–438. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.01.093.

MEADOWCROFT, A. D., HOWROYD, S., KENDALL, K., KENDALL, M. (2013): Testing Micro-Tubular SOFCs in Unmanned Air Vehicles (UAVs). In: *ECS Transactions* 57 (1), S. 451–457. DOI: 10.1149/05701.0451ecst.

MOOG, F., BOCKELMANN, L. (2015): Proposals for a new Electricity Market Model. Poster presented at the 9th International Renewable Energy Storage Conference. EUROSOLAR; WCRE. Düsseldorf, 09.03.2015.

MWV (2016): Anzahl der Tankstellen in Deutschland von 1950 bis 2015. Hg. v. Statista. Online verfügbar unter <http://de.statista.com/statistik/daten/studie/2621/umfrage/anzahl-der-tankstellen-in-deutschland-zeitreihe/>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

NEW ENERDAY GMBH: Produktblatt. Online verfügbar unter <http://new-enerday.com/index.php?np=4c&sp=de>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

NIEDER, T., BICKEL, P., MEMMLER, M. (2015): Zeitreihen zur Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland. unter Verwendung von Daten der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Stand: August 2015. Unter Mitarbeit von Thomas Nieder, Peter Bickel, Michael Memmler und Ulrike Zimmer. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

NISSAN MOTOR CO., L. (2016): Nissan announces development of the world's first SOFC-powered vehicle system that runs on bio-ethanol electric power. Online verfügbar unter <https://newsroom.nissan-global.com/releases/160614-01-e>, zuletzt geprüft am 03.07.2016.

NOW GMBH (2015): NOW: now-gmbh.de | Wasserstoff tanken – Minister Dobrindt unterstützt Ausbau des Tankstellennetzes in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.now-gmbh.de/de/aktuelles/presse/minister-dobrindt-unterstuetzt-ausbau-des-tankstellennetzes-in-deutschland>, zuletzt geprüft am 20.06.2016

OSWALD, J. (2010): Vor- und Nachteile verschiedener Motorkonzepte für Fahrtriebe. Zur DRIVE-E Akademie 2010. Hg. v. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und Fraunhofer Gesellschaft (FhG). Online verfügbar unter https://www.drive-e.org/wp-content/uploads/vortraege_2010/13_Do_Oswald_Fahrtriebe.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

PEEK, M., DIELS, R. (2016): Strommarktdesign der Zukunft. Hg. v. Umweltbundesamt. r2b energy consulting GmbH. Dessau-Roßlau (Climate Change, 20/2015). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/climate_change_20_2015_strommarktdesign_der_zukunft_0.pdf, zuletzt geprüft am 01.05.2016.

PFAFFERODT, M., HEIDEBRECHT, P., STELTER, M., SUNDMACHER, K. (2005): Model-based prediction of suitable operating range of a SOFC for an Auxiliary Power Unit. In: *Journal of Power Sources* 149, S. 53–62. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.02.011.

RAJASHEKARA, K., MACBAIN, J., GRIEVE, M. (2006): Evaluation of SOFC Hybrid Systems for Automotive Propulsion Applications. In: *IEEE Trans. Veh. Technol.*, S. 1593–1597. DOI: 10.1109/IAS.2006.256741.

RUNKEL, M., MAHLER, A., KUNZ, C. (2015): Metaanalyse zur Energiewende im Verkehr. Unter Mitarbeit von Claudia Kunz. Hg. v. Agentur für Erneuerbare Energien (Forschungsradar Energiewende). Online verfügbar unter <http://www.forschungsradar.de/metaanalysen/einzelansicht/news/metaanalyse-zur-energiewende-im-verkehrssektor.html>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

- SCHLITZBERGER, C. (2012): Solid-oxide-fuel-cell-(SOFC)-Systeme mit integrierter Reformierung bzw. Vergasung von Kohlenwasserstoffen. Aachen: Shaker (Berichte aus der Energietechnik).
- SCHMID, A. (2016): Sunfire baut Wasserstoff-Speicher und -Kraftwerk. Hg. v. WirtschaftsWoche Online. Online verfügbar unter <http://green.wiwo.de/energiespeicher-und-kraftwerk-neue-anlage-erzeugt-wasserstoff-und-strom/>, zuletzt geprüft am 10.05.2016.
- SIEMENS AG (Hg.) (2016): Siemens erreicht Weltrekorde in Düsseldorfer Kraftwerk Fortuna. Online verfügbar unter <http://www.siemens.com/press/de/feature/2014/corporate/2014-02-lausward.php?content=CC&content=E&content=EP>, zuletzt geprüft am 10.05.2016.
- SOLIDPOWER (2015): BlueGEN - Technische Daten. Online verfügbar unter <http://www.bluegen.de/de/produkte/bluegen/bluegen-technologie/technische-daten/>, zuletzt aktualisiert am 17.08.2015, zuletzt geprüft am 17.05.2016.
- SOMMER, K., MESENHÖLLER, E. (2014): SOFC-Brennstoffzelle für gebäudebezogene Kraft-Wärme-Kopplung. Tests und erste Erfahrungen für eine optimale Einbindung in eine Gebäudeheizung. Unter Mitarbeit von Klaus Sommer und Eva Mesenhöller. Hg. v. BTGA.
- SPECHT, E. (2007): Verbrennungstechnik. Wintersemester 2007/2008. Hg. v. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Online verfügbar unter http://www.uni-magdeburg.de/isut/TV/Download/Kapitel3_VerbrennungSS2003.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2016.
- STAN, C. (2012): Alternative Antriebe für Automobile. Hybridsysteme, Brennstoffzellen, alternative Energieträger. 3. Aufl. 2012. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- STEINBERGER-WILCKENS, R., MUBBALA, R. (2012): Study on the Integration of an SOFC system into the OnBoard Electricity System of the Biogas Bus. Deliverable WP 6.4 Final Report. Unter Mitarbeit von Robert Steinberger-Wilckens, Ritah Mubbala und Petra Seidenberg. Hg. v. Baltic Biogas Bus.
- STENGER, S. (2014): Konstruktion und Simulation eines SOFC-Systems mit Anodenabgasrezirkulation. 1., Aufl. Göttingen, Niedersachs: Cuvillier, E (Schriftenreihe des Energie-Forschungszentrums Niedersachsen (EFZN), 21).
- STENGER, S., KÖHLER, S., NASCH, A.-T., LEITHNER, R., SCHOLL, S., EILTS, P. (2012): Machbarkeitsstudie eines mit Methan betriebenen Nullemissionsfahrzeugs. In: Martin Ackerl, Axel Munack und Jürgen Krahel: Innovative Automobiltechnik III. Zukunftsweisende Arbeiten von Nachwuchsforschern in der Industrie und an Universitäten ; [Tagungsband des dritten Wissenschaftssymposiums Automobiltechnik (WISAU)]. 1., Aufl. Hg. v. Helmut Tschöke. Göttingen: Cuvillier.
- STERNER, M.; STADLER, I. (2014): Energiespeicher - Bedarf, Technologien, Integration. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (SpringerLink : Bücher).
- SUZUKI, T., FUNAHASHI, Y., YAMAGUCHI, T., FUJISHIRO, Y., AWANO, M. (2007): Design and Fabrication of Lightweight, Submillimeter Tubular Solid Oxide Fuel Cells. In: *Electrochem. Solid-State Lett.* 10 (8), S. A177. DOI: 10.1149/1.2739211.
- THOMAS, C. E. ((2008): Comparison of Transportation Options in a Carbon-Constrained World: Hydrogen, Plug-in Hybrids and Biofuels. Hg. v. NHA Annual Hydrogen Conference 2008. Online verfügbar unter <http://nha.confex.com/nha/2008/recordingredirect.cgi/id/373>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.
- TÜV SÜD AG (2016): Weltweit 54 neue Wasserstoff-Tankstellen im Jahr 2015. Online verfügbar unter <http://www.tuev-sued.de/tuev-sued->

konzern/presse/pressearchiv/weltweit-54-neue-wasserstoff-tankstellen-im-jahr-2015, zuletzt geprüft am 20.06.2016.

UNECE TRANSPORT DIVISION (2005): Vehicle Regulations: Regulation No. 101, Revision 2. Hg. v. UNECE Transport Division. Online verfügbar unter <http://www.unece.org/trans/main/wp29/wp29regs/r101r2e.pdf>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY (DOE) (2012): Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development, and Demonstration Plan - 3.4 Fuel Cells. Planned program activities for 2011-2020. Hg. v. United States Department of Energy (DOE). Online verfügbar unter http://energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/fcto_myrrdd_fuel_cells.pdf, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

VAN BASSHUYSEN, R. (2015): Erdgas und erneuerbares Methan für den Fahrzeugantrieb. Wege zur klimaneutralen Mobilität. Wiesbaden: Springer Vieweg (SpringerLink : Bücher).

VAN WIJK, A.: P13-14 Our Car as Power Plant – changing the energy system. Hg. v. STW. Online verfügbar unter <http://www.stw.nl/nl/content/p13-14-our-car-power-plant-%E2%80%93-changing-energy-system>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

VOM SCHLOß, J., LEITES, K. (2014): Brennstoffzellenstrom für Hochseeschiffe. SchIBZ erprobt Reformierung von Dieselmotorkraftstoff. In: *HZwei* 2014, Oktober 2014.

WEIGEL, M. (2014): Ganzheitliche Bewertung zukünftig verfügbarer primärer Stahlherstellungsverfahren. Einschätzung der möglichen Rolle von Wasserstoff als Reduktionsmittel. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Fachbereich D – Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,. Online verfügbar unter <http://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docId/5959>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

WIKIPEDIA (2015a): Flüssiggas. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=148079367>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

WIKIPEDIA (2015b): Energiedichte. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=148802383>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

WIKIPEDIA (2015c): Diesel-Kreisprozess. Hg. v. Wikipedia. Online verfügbar unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=147221305>, zuletzt geprüft am 17.05.2016.

WILHELM, J. C. (2010): Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek (Schriften des Forschungszentrums Jülich / Reihe Energie & Umwelt, Bd. 73).

WINKLER, W. (2002): Brennstoffzellenanlagen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (VDI-Buch).

WURSTER, R., WEINDORF, W., ZITTEL, P., SCHMIDT, P., HEIDT, C. LAMBRECHT, U., LISCHKE, A., MÜLLER, S. (2014): LNG als Alternativkraftstoff für den Antrieb von Schiffen und schweren Nutzfahrzeugen. Kurzstudie im Rahmen des Auftrags Wissenschaftliche Begleitung, Unterstützung und Beratung des BMVBS in den Bereichen Verkehr und Mobilität mit besonderem Fokus auf Kraftstoffe und Antriebstechnologien sowie Energie und Klima des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). München/Ottobrunn, Heidelberg, Berlin.